

设备故障诊断技术

中国金属学会

冶金继续工程教育丛书

科学出版社

沈永福 高大勇 编著

内 容 简 介

本书是“冶金继续工程教育丛书”之一，书中介绍的设备故障诊断技术是一门新兴技术，它是现代设备管理和设备预知维修的基础技术之一。本书共十一章，分别讲述测振、测温、油液分析、无损检测等技术的原理以及利用这些技术对设备进行在线监测与故障诊断的方法。

本书内容深入浅出，既有理论基础知识，又有实际操作技术，可作为继续工程教育用书，也可作为各类工业企业中设备管理、维修人员以及高等院校有关专业师生的参考书。

冶金继续工程教育丛书

设备故障诊断技术

沈水福 高大勇 编著

责任编辑 李淑兰

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100707

北京昌平百善印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990年4月第 一 版 开本：787×1092 1/32

1990年4月第一次印刷 印张：10 1/8 插页：2

印数：0001—8 000 字数：228 000

ISBN 7-03-001682-3/TB·46

定价：6.60元

序

中国金属学会组织编写了“冶金继续工程教育丛书”，为大家办了一件好事。积极开展继续教育，对于提高冶金科技人员水平，促进冶金工业的发展具有重要意义。希望冶金战线各级领导重视这项工作，努力创造条件，为科技人员在职学习提供方便；同时也殷切希望广大冶金科技工作者坚持学习，不断吸收新知识，学习新技术，为实现四化、振兴中华做出更大贡献。

中国继续工程教育协会理事

冶金工业部副部长



一九八八年十二月

前 言

设备故障诊断技术是一门新兴技术，它是随着人们对设备可靠性的要求和对设备现代化维修、管理的需要而发展起来的。

现代化的生产设备精度高、功能多、结构复杂、运行速度快。一旦发生故障，如不及时发现处理，不仅影响生产，造成重大的经济损失，甚至还会酿成灾祸。为保证设备正常运行，必须实施设备的现代化管理与维修制度，把定期维修改为预知(状态)维修，而这种维修方式的实现需要有设备的状态监测及故障诊断技术的支持。

把人体医疗诊断的一些基本逻辑思想推广到工程技术中，就形成了工程诊断学，也称技术诊断(Technical Diagnostics)。它利用机器设备在运行中呈现出的某些物理参数的变化，如温度升高、噪声增大、振动加剧、润滑油污染及绝缘物劣化等现象，进行综合分析研究，对设备进行监测与诊断。

设备的状态监测与故障诊断技术本身又与近代科学技术的发展互相渗透，互相促进。在设备故障诊断中应用了声、振测试及信号的分析处理技术，红外测温技术，原子吸收光谱及铁谱分析技术，无损检测技术等，而在应用中又促进了这些技术的发展和深化，这些基础技术的进步与发展又更进一步推进了设备故障诊断技术水平的提高。

从80年代初我国开始推广设备故障诊断技术以来，已取得不少成就，但各地开展的程度不同。因此在编写本书的过程中，不但注意到了基础理论的阐述，而且还收集了一些成功的例子。本书理论与实际并重，可作为继续工程教育用书，也可作为各类工业企业设备管理、维修人员以及高等院校有关专业师生的参考书。

本书承北方工业大学沈久珩教授主审、北京科技大学陈克兴教授复审，谨此表示谢意。

在本书出版过程中，得到了重庆钢铁公司的大力支持，在此一并致谢。

由于编者水平所限，书中不妥处，恳请读者批评指正。

编著者

1989年4月

目 录

序

前言

1 绪论	(1)
1.1 什么是设备的故障诊断	(1)
1.2 设备故障诊断技术与设备管理、维修	(2)
1.3 怎样开展设备故障诊断	(3)
1.4 设备故障诊断技术的应用概况	(4)
1.5 设备故障诊断中运用的主要技术	(6)
2 机械振动的测试技术	(9)
2.1 振动	(9)
2.2 振动测试系统	(15)
2.3 传感器	(17)
2.4 磁带记录仪	(44)
3 信号的分析与处理	(49)
3.1 信号的时域分析	(49)
3.2 信号的时域、频域转换	(55)
3.3 信号的分析与处理	(67)
4 齿轮箱的振动诊断技术	(82)
4.1 齿轮传动中的振动信息	(82)
4.2 齿轮振动监测的频率分析	(89)
4.3 齿轮振动监测的时域分析	(100)
5 轴承的故障诊断技术	(108)
5.1 滚动轴承的振动监测	(109)
5.2 冲击脉冲法 (SPM法)	(121)
5.3 接触电阻法	(130)

5.4	滑动轴承的状态监测	(133)
6	旋转机械振动监测技术	(138)
6.1	旋转机械的故障及其振动特性	(139)
6.2	旋转机械振动信号的监测与分析	(148)
6.3	现场动平衡技术	(162)
7	电机、电器的监测与诊断	(172)
7.1	电机绝缘性能劣化的测定	(172)
7.2	继电器的诊断	(182)
7.3	电机异常振动监测	(185)
7.4	变压器故障监测	(189)
8	机械设备的温度监测	(192)
8.1	温度测量的基本概念	(192)
8.2	电阻温度计	(195)
8.3	热电偶测温简介	(198)
8.4	辐射测温技术	(201)
8.5	红外测温技术在故障诊断中的应用	(220)
9	油液分析技术	(225)
9.1	光谱油液分析技术	(225)
9.2	铁谱分析技术	(234)
9.3	铁谱技术的应用	(253)
10	无损检测技术	(262)
10.1	射线照相探伤	(262)
10.2	超声波探伤	(269)
10.3	声发射技术	(280)
10.4	其它探伤技术的应用	(288)
11	计算机监测、诊断系统	(296)
11.1	计算机的基本知识	(297)
11.2	计算机诊断监测系统的基本组成与功能	(304)
11.3	高级计算机监测诊断系统	(307)
11.4	存在的问题与发展趋势	(312)

1.1 什么是设备的故障诊断

“设备故障诊断”是近几年发展起来的一门新兴技术，其英语全名是Condition Monitoring and Faults Diagnosis。从其字面上解释，应包含两方面内容：一是对设备的运行状态进行监测；二是在发现异常后对设备的故障进行分析、诊断。显然，这两者是不可分割的。如果用更详细一些的语言来描述，就是掌握设备现在的状况及信息，预知和预测有关异常或故障的程度，分析、判断原因以及对将来的影响程度，找出必要的对策。通俗地说，就是给机器看病。

“设备”一词泛指各种各样的机器设备、装置和结构，它包括冶金工厂的轧钢机、冶金炉和各种风机；航空、航天工业中的各种飞行器和发射装置；石油化学工业中的压缩机和各种反应塔、罐；农业中的拖拉机、收割机；交通工业中的桥梁、汽车等等。很显然，各行各业都具有开展该项技术的服务对象。实际上，我国各工业部门都已经开展并推广了设备故障诊断的技术，并已获得了可喜的成果。

1.2 设备故障诊断技术与设备管理、维修

在设备管理的发展史上，设备的维修经历了事后维修（Breakdown Maintenance）和定期预防维修（Preventive Maintenance）的发展过程，近年来在发达工业国家已开始实行状态维修或预知维修（Condition Maintenance or Predictive Maintenance）。

在18世纪及19世纪时期，由于工业生产的规模、机器设备本身的技术水平和复杂程度都很低，设备的利用率和设备的维修费用问题尚未引起人们的注意，对设备事故也缺乏认识，因此，对设备的管理是采取坏了才修的办法，即事后维修的方式。

进入20世纪后，随着大生产的发展，生产方式有了很大的变化，加上机器装备本身的技术复杂程度的提高，机器故障及事故对生产的影响显著地增加，于是出现了定期预防维修的方式，也称为计划维修方式。这种维修方式最早是在航空飞行器上实行，它试图在机器发生事故之前就进行检修或更换零、部件。到50年代，以冶金、化工为代表的一些流程工业也迅速采用了此种维修方式。它比事后维修前进了一步，多年来在设备管理上起到了积极的作用。

由于对设备的故障发展规律缺乏认识，也没有监测故障的科学手段，这种只凭经验和某些统计资料制定的维修计划，很难预防许多由于随机因素引起的事故，而对某些设备却又往往造成过剩维修。在第二次世界大战时期，美国军用装备频繁出现故障，使计划维修方式的弱点明显地暴露了出来。特别是在60年代以后，由于计算机和电子技术的飞跃发展，更加促进了工业生产的现代化和机器设备的大型化、连续化、自动化，如果一旦发生事故，不仅会造成经济上的巨

大损失，还会引起灾害，甚至造成各种社会问题。

现代化设备大都是技术先进、结构复杂、检查工作量
大、检查质量要求高的设备。一般说来，故障因素很难靠人
的感官和经验检查出来。对复杂机器进行检查，用解体检查
是不可思议的。因此，必须采用先进的仪器和科学的方法来
监测和诊断。为适应现代化生产的需要，计划维修方式应由
预知维修方式所代替。为保证这一方式的实施，必须对设备
运行状态进行监测，并进一步对设备的故障进行分析、诊
断。

运用诊断技术开展设备预知维修，其经济效益是明显
的，这可以从减少事故和降低维修费用两方面直接体现出来。
日本资料报道，采用诊断技术后，事故率减少75%；维修
费用可以降低25—50%。英国对两千个国营工厂进行的调
查表明，采用诊断技术后，维修费用每年可节约3亿英镑。美
国Pekrul发电厂的技术报告提出了一个计算经济效益系数C
的公式：

$$C = \frac{B(\text{系统能节约的费用})}{A(\text{诊断成本})}$$

该厂某年的经济效益系数为

$$C = \frac{1260000}{35000} = 36$$

从上面几个例子不难看出，诊断技术的经济效益确实很
显著。经验表明，从设备维修方式改革的角度来看待诊断技
术，才能对它的经济效益和重要性有深刻的理解。

1.3 怎样开展设备故障诊断

设备故障诊断技术大致可以分为两大类：一为简易诊
断；一为精密诊断，简易诊断可以比喻为医院的门诊，它凭

藉简单的仪器对监测到的信号作出初步的判断，结果是简单的：有病或正常。当然，对一些“多发病”、“常见病”，如轴承振裂、间隙过大等故障，凭藉监测人员的经验和技术水平也能作出精确的判断。简易诊断使用的仪器简单，一般常用仪器是便携式测振仪、红外点温仪或国内外研制出来的各种专用诊断仪器，如轴承监测仪、电缆检测仪等等。这些仪器使用方便，易于掌握。所以一开始都是从简易诊断做起，这样，较易获得效果。

在此基础上积累了经验后，再使用如频谱分析仪及其它用计算机支持的一些高档专用仪器，便可开展精密诊断的工作。

开展精密诊断应当具备三方面的基本知识：首先要对所监测的设备的设计、制造、安装、运转和维修极为熟悉，这是基础；其次是掌握设备故障诊断技术的知识，也就是本书介绍的各种诊断技术的方法及原理，信号分析、处理技术，电子技术等，并精通所使用的各种精密专用仪器；第三是应学会逻辑诊断，即根据机器的特征和运行状态之间的逻辑关系进行诊断，在数理统计理论的指导下发展并完善判别方法。

以上三个方面若能有机地组织在一起，将能获得更好的效果。

1.4 设备故障诊断技术的应用概况

机器设备故障诊断技术最早是在60年代初期，由于航天工业和军事工业的需要而发展起来的，以后逐步推广到核能设备、动力设备和其它一些大型成套设备中，诸如流体动力机械（发动机、汽轮机、压缩机和水轮机等），各种金属切削机床、压力加工设备，各种电机、运输机械以及压力设

备、管道系统等等。

下面分别叙述设备故障诊断技术在一些领域中应用的情况。

(1) 航空发动机的故障诊断

现代客机的发动机在运行过程中需要被监测200—400个参数。这些参数分为三类：一是直接显示在驾驶舱中，为提供正确驾驶所需要的信息，如发动机的振动情况等；第二类是在飞机舷舱中用专用记录装置记录在磁带上的信息；第三类是地面检修时得到的信息，如滤油器检验等。多数记录参数送到诊断中心进行分析，根据分析结果再与过去的记录进行比较，作出可以继续正常飞行或需进一步进行增级观察、更换零件或发动机停止使用的决策。

(2) 船用机器的故障诊断

对舰船上的各种机器和电机，采用振动分析可以发现由于轴弯曲、偏心、不平衡而引起的振动以及齿轮和轴承等零件的缺陷。采用统计分析和计算机信息处理技术，可以确定这些机器状态的好坏，以便及时更换零件和采取预防措施。

振动、噪声测量以及声发射技术都是所采用的基本监测手段，所监测的机器包括船用泵、压缩机、柴油机、蒸汽机和燃汽轮机等。

(3) 车用发动机的故障诊断

活塞式发动机广泛用于汽车、拖拉机、固定式或移动式柴油机中。在不拆卸的情况下确定发动机的工作状态具有重要的意义，进行预防性的维护修理可以收到很大的经济效益。在国外，该领域中的诊断工作是由设有振动、噪声测量设备的流动诊断站来进行的。

(4) 机床和其它加工机械故障诊断

随着机床等加工机械自动化程度的不断提高，性能不断

完善、结构也日趋复杂化。该类设备的诊断分为两方面，即精度诊断和故障诊断。特别是对于机床，精度诊断具有更重要的意义。近年来，开始用信息论作为基础制定合理的寻障程序以减少检修劳动量，提高设备运行的可靠性。

(5) 冶金设备的故障诊断

目前，对轧钢机的故障诊断，一般是对扭矩、轧制力进行监测，而用声发射监测那些已产生裂纹的庞大机架。冶金工厂中的大批风机、空压机等设备配备了简易的测振，测温仪器，或装置了专用振动、温度监测装置，该装置具有数字显示、打印记录、趋势分析及声光报警等功能，有力地支持了设备点检制度，为预知维修提供了有用的信息。

上述这些例子只是在开始推广过程中的一些实例，从中可以看出，故障诊断技术具有较强的生命力，而且具有很强的渗透能力，几乎普及到所有行业。

从发展趋势看，近年来国内外从事该领域的研究人员不断增加，研究手段和方法也日新月异，70年代以来发展尤其迅速，在诊断技术方法上已经从感官直接判断进入到近代测试、监测技术的阶段，新的、专用的诊断仪器不断推出。相信在不久的将来，故障诊断技术会有突破性的发展。

1.5 设备故障诊断中运用的主要技术

目前，设备故障诊断中运用的主要基础技术有：

(1) 电子和计算技术

一些专用仪器和一些新的信号的拾取、分析及处理的方法都基于该两项技术。这是一门公共的基础技术。

(2) 声、振测试和分析技术

机器设备运行状态的好坏与机器的振动是直接联系着

的。它是目前厂矿开展诊断技术中应用最广泛、最普遍的技术之一，且已取得较好的效果。振动、声信号的拾取、传输和分析用的仪器近年来又有了很大的发展并已达到相当高的水平，无疑又促进了该项技术在各个应用领域中的发展。

（3）测温技术

机器状态的优劣与温度也是密切相关的。温度的测试技术，尤其是适合于在线、非接触式、远距测试的红外测温技术的运用比较普遍，被测点的温度数值可以直接读出，因而在利用温度来对设备进行诊断的过程中能获得立竿见影的效果。

（4）油液分析技术

用来研究摩擦磨损的油液分析技术，在设备的故障诊断中也被广泛地应用着，除SOAP法外，铁谱分析技术的应用也很普遍。在对减速机、液压系统等设备的故障诊断中已经有了许多成功的实例。

直读式和分析式铁谱分析仪已在我国研制成功，并投入了生产使用。这对我国设备故障诊断技术的发展无疑是有力的支持。

（5）应力、应变测试技术

60年代发展起来的应力、应变及扭矩的测试技术对于重载、低速运行状态下的重型机器，如轧钢机、起重运输设备等进行监测或进行部分故障诊断是非常有效和实用的。在冶金工厂中应用此种技术较为普遍。

（6）无损检测技术

无损检测技术是一门独立的技术，近年来被引进到设备的故障诊断技术中。如超声及射线探伤，磁粉、着色渗透液的表面裂纹损伤探伤，以及声发射探伤等技术被用来对大型固定或运动着的装置进行监测和诊断，已越来越受到人们的

重视。

上面提到的只是一些主要的基础技术，它们都是些应用技术。在运用这些技术时，常常还会用到信号的分析与处理技术，以便从测试得到的数据中获取更为明确和有用的信息。

设备故障诊断是一门新兴的技术，正在迅速地发展着，已经在实践中应用的各种诊断技术还在不断地深化和发展，一些更先进、有效的诊断技术还会被开发出来。因此，有关的工程技术人员必须关心和注视各种新技术的发展动向，在实践中去扩充新的内容，使我国的设备故障诊断技术更加完善、先进、实用。

机械振动的测试技术

工程实际中存在着大量的振动问题。例如，零件原始制造误差，运动零、部件之间的间隙，零件间的滚动或摩擦，或者回转机件与往复机件中产生了不平衡力等，都会引起振动。而且，随着零件间的磨损，零件表面产生的剥落、裂纹等损伤，振动会更加剧烈。另一方面，机械设备还可能因某个微小的振动，引起其它部件的共振，成为主要的振动或噪声源，甚至还会造成危害极大的设备事故。总之，机械设备的振动与其运行状态的好坏有着密切的关系。随着设备故障的产生和逐渐加重，设备的振动也会随之加剧。以上种种原因，促使了人们研究机械设备的振动问题，企图通过对设备振动的测试、分析，搞清设备所处状态的好坏，找出引起振动的原因，以便加以消除或作出有效的控制。

本章将介绍振动的基本性质、有关术语、振动的测试技术以及所应用的仪器。

2.1 振 动

振动是指物体在平衡位置上作往复运动的现象。最简单的振动是简谐振动。例如一个单摆（图2-1），一个弹簧质量

系统（图2-2）等。

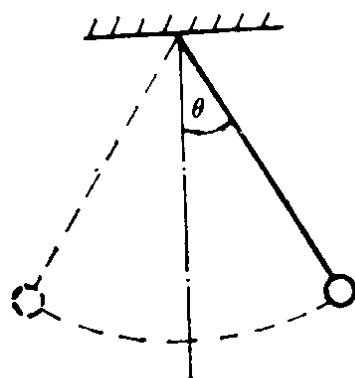


图2-1 单摆

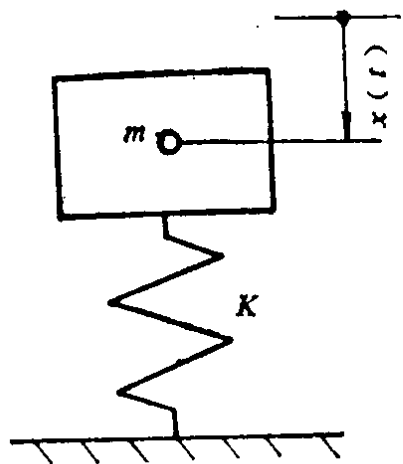


图2-2 弹簧质量系统

简谐振动的波形可以用正弦或余弦曲线来表示。一台机械设备的振动很少是单个的正弦波形，往往是由两个或更多的正弦波合成的复杂振动，如图2-3所示，图2-3(a)为一内燃机活塞的周期振动波形；图2-3(b)是一台减速机实测的振动波形。

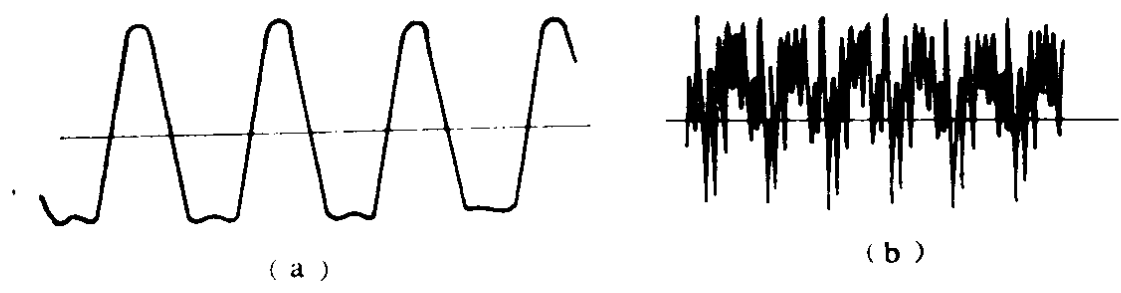


图2-3 复杂振动波形

(a) 内燃机活塞的周期振动波形；(b) 减速机的振动波形

振动波形比较复杂，但可以用某些表征其特征的参量，例如振幅、频率及相位等进行描述和分析，