

机械设备 故障诊断 基础知识

中国石化总公司长岭炼油厂设备研究所编

湖南大学出版社



GUZHUANG • ZHENDUAN

内 容 提 要

本书较系统地介绍机械设备故障诊断基础理论、测试仪器和基本技术。选材切合现场需要，讲求实用；内容深入浅出，图文并茂，便于自学，可作培训教材，亦可供设备维修人员和有关工程技术人员参考之用。

机械设备故障诊断基础知识

陈大禧 李志强 主编

朱光汉 主审

责任编辑 左宗仰



湖南大学出版社出版发行

(长沙市岳麓山)

湖南省新华书店经销 湘潭大学印刷厂印刷



850×1168毫米 32开 11.6875印张 275千字

1989年11月第1版 1989年11月第1次印刷

印数：1—2500册

ISBN 7—314—00498—6/TH·16

定价：8.50元

序

机器故障诊断是研究如何由机器运行中的一些状态变化来判断机器运行是否正常和预测机器是否会出现故障的一门新学科。近年来,这一学科发展极其迅速,这是由于工业生产的发展使机器设备往往形成一个庞大的系统,任何突发性的故障将会导致巨大经济损失,故而人们迫切希望机器设备故障的出现是可预测的。这样一来,不但可赢得维修的时间,更可避免灾难性的后果。

机器故障诊断涉及到很多基础知识和先进技术,是一门综合性学科。虽然目前已有不少专著和论文问世,但这些专著和论文象是“阳春白雪”,尚难为广大生产一线的技术人员所接受。因此,编写一本较系统而又深入浅出地介绍故障诊断基础理论测试仪器和基本技术且富有实例的参考书是十分有意义的。

中国石化总公司长岭炼油厂设备研究所陈大禧高级工程师为首的编写组所编写的这本书内容丰富,浅显易懂,并有很多他们从生产实际问题中总结出来的实例。由于作者具有丰富的实践经验,对工厂工程技术人员的水平和要求有较好的了解,因此这本书的内容较适合于我国当前的实际,对广大工程技术人员有较高的参考价值。我相信,这本书的出版对于机器故障诊断这一新学科在生产实际中的应用将会起到良好的作用,从而使我国的设备维修水平达到一个新的高度。

湖南省振动工程学会理事长 朱光汉
湖南大学教授

前 言

设备状态监测和故障诊断技术是设备现代化管理的一个重要侧面，它对保证设备长周期安全平稳运行，具有重大的作用，是设备维修制度由定期维修转向状态维修必须具备的技术条件，是企业取得设备运行周期利润最高的一种手段，因此，它越来越受到生产维修部门和现场设备维修人员的重视。

目前，与故障诊断技术有关的基础读物还不多见。已出版的一些专著则过于深奥，难为现场人员理解。鉴于这种情况，为适应设备故障诊断技术普及工作的需要，我们将为湖南设备管理协会举办的培训班所写讲稿进行了补充和修改，并结合本厂几年来的实践经验，编写成本书。

本书对有关理论的叙述力求深入浅出，选材上力求全面考虑现场需要，文字通俗，图文并茂，讲求实用，便于自学，可作培训教材和有关人员自学使用。

本书由陈大禧和李志强主编，参加编写的还有刘庆云、吴新汨、朱刚，全书最后由陈大禧整理定稿。湖南大学实验研究中心朱光汉教授对此书作了审阅和修改，该校机械系王正玲老师也参加了部分章节的修审工作。在此谨向他们表示衷心感谢，并向对本书的出版加以推荐和协助的有关人员致谢。

限于水平问题，加上时间仓促，书中难免有错，敬请读者指正。

编者 1987.7于

中国石化总公司长岭炼油厂设备研究所

目 录

前言

第一章 绪论

- 1.1 设备故障诊断技术的含义·····(1)
 - 1. 状态维修的概念·····(1)
 - 2. 现代化的监测诊断手段·····(5)
 - 3. 动态诊断·····(6)
- 1.2 设备诊断技术的内容和方法·····(6)
- 1.3 两种实用化诊断体系·····(10)

第二章 振动理论概述

- 2.1 基本概念·····(11)
- 2.2 振动的分类·····(13)
 - 1. 从动力学角度分类·····(13)
 - 2. 按振动信号处理特点分类·····(14)
 - 3. 按振动频率高低进行分类·····(15)
- 2.3 确定性振动的描述·····(15)
 - 1. 幅值大小的描述·····(16)
 - 2. 三种不同振动参量之间的关系·····(17)
 - 3. 振动的合成和分解——频谱分析·····(19)
- 2.4 自由振动·····(26)
 - 1. 单自由度无阻尼线性系统的自由振动·····(26)
 - 2. 单自由度有阻尼线性系统的自由振动·····(30)
- 2.5 强迫振动·····(34)
 - 1. 简谐力作用下单自由度系统的强迫振动·····(34)
 - 2. 任意力作用下的强迫振动·····(42)

2.6	自激振动	(44)
2.7	随机振动的描述	(47)
1.	随机变量在幅值域中的描述	(49)
2.	随机振动在时域的描述	(54)
3.	随机振动在频率域内的描述	(60)

第三章 测量装置的构成及基本要求

3.1	测量装置的构成	(64)
3.2	测量基本概念	(65)
3.3	测量装置的基本特性	(67)
1.	线性系统	(67)
2.	测量装置的静态特性	(68)
3.	常见测量装置的动态特性	(71)
3.4	选择测量装置应当考虑的一些因素	(85)

第四章 传感器

4.1	传感器的作用及分类	(88)
1.	作用	(88)
2.	传感器的分类	(88)
4.2	传感器的接收原理	(89)
1.	相对式接收原理	(90)
2.	惯性式接收原理	(90)
4.3	传感器的主要性能参数	(91)
1.	灵敏度	(91)
2.	频率范围	(92)
3.	动态范围	(93)
4.	分辨率与最低可测振级	(94)
5.	线性度与最大可测振级	(95)
6.	相位移	(95)
7.	振动测试过程对传感器的要求	(95)
4.4	电动式传感器	(95)

1.	变换原理.....	(95)
2.	惯性式电动传感器的结构.....	(96)
3.	各种惯性式电动传感器的特点.....	(97)
4.5	压电式传感器.....	(98)
1.	变换原理.....	(98)
2.	压电式加速度传感器的结构.....	(99)
3.	前置电压放大器和电荷放大器.....	(100)
4.	在加速度计使用中要考虑的问题.....	(103)
4.6	其它型式的传感器.....	(108)
1.	非接触式涡流传感器.....	(108)
2.	光导纤维传感器.....	(113)
3.	电阻式传感器.....	(115)
4.	电容传感器.....	(119)
第五章 记录分析仪器		
5.1	显示记录仪器.....	(123)
1.	相位计.....	(123)
2.	电平记录仪.....	(125)
3.	光线示波器.....	(126)
4.	磁带记录仪.....	(139)
5.2	频率分析仪.....	(148)
1.	滤波器.....	(148)
2.	模拟式频率分析仪.....	(160)
3.	数字式FFT分析仪.....	(171)
第六章 振动的简易监测		
1.	振动的测点与测量方向的确定.....	(179)
2.	振动参数的合理选择.....	(180)
3.	振动简易诊断中判断标准的确定.....	(182)
4.	数据的记录.....	(185)
5.	根据振动记录进行设备状态维修.....	(186)
第七章 滚动轴承失效诊断		

7.1	滚动轴承失效类型	(191)
7.2	滚动轴承失效脉冲震动诊断法	(192)
1.	什么叫震动脉冲法(冲击脉冲法)	(192)
2.	脉冲震动与滚动轴承状态的关系	(194)
3.	43A脉冲震动仪简介	(194)
7.3	滚动轴承失效振动监测诊断法	(205)
1.	有效值和峰值	(208)
2.	波峰系数	(208)
3.	包络线检波信号的频率分析	(209)
4.	同周期相加分析	(210)
5.	振幅的概率密度函数	(210)
7.4	其它诊断方法	(212)
第八章 机组故障的诊断		
8.1	故障机组原始数据的采集	(213)
1.	数据收集的重要性	(213)
2.	数据收集要点	(213)
8.2	振动数据分析	(216)
1.	振动分析的目的	(216)
2.	振动分析基本方法	(217)
8.3	设备振动故障的诊断和治理	(222)
1.	如何推测机组振动的原因	(222)
2.	设备故障的诊断步骤	(224)
3.	设备故障诊断与对策	(225)
8.4	机组故障诊断实例	(228)
1.	油泵断轴强振故障的诊断	(228)
2.	离心机高压缸止推轴承烧损事故诊断	(235)
3.	风机齿轮箱振动诊断	(236)
第九章 转子动平衡		
9.1	平衡机平衡法	(239)

1.	平衡机简介	(239)
2.	用 $YYW-300$ 平衡机对设备进行动平衡	(243)
	用 $YYW-300A$ 平衡机对设备进行动平衡	(243)
9.2	现场动平衡	(252)
1.	周移法	(254)
2.	二点法 (二点三圆法)	(258)
3.	三圆法	(260)
4.	影响系数法	(263)
9.3	用 TI--59 型可编程序计算器进行 现场轴系动平衡计算	(268)
9.4	动平衡标准及国外转子检验数据	(277)
附:	转子分类及其平衡方法	(285)

第十章 对轮找正

10.1	找正的概念及方法	(290)
10.2	双表找正法	(291)
10.3	三表法找正	(300)
10.4	单表法找正	(304)
10.5	找正方法的选取	(312)
10.6	找正的质量要求	(312)

第十一章 铁谱分析

11.1	铁谱分析的基本原理	(314)
11.2	润滑油取样要求	(316)
11.3	磨粒的识别	(317)
11.4	定量参数和磨损指标	(321)

附录

附1.	机器振动的评定标准	(323)
附2.	常用设备状态监测及分析仪器	(333)

附3.	部分名词术语解释	(335)
附4.	振动信息归档方法	(340)
附5.	波形衰减比 ψ 与阻尼比 D 对应值表	(343)
附6.	数字修约法	(350)

第一章 绪 论

1.1 设备故障诊断技术的含义

设备状态监测与故障诊断是一门近二十年来才发展起来的新技术,许多人对此还感到比较陌生。那么,什么是设备故障诊断技术呢?

概括地说,它是适应设备状态维修的需要,采用现代化的分析测试手段,对在运行设备的状态(或故障)进行监测诊断的技术。

所谓“故障”,指的是“一台装置在它应达到的功能上丧失了能力”,即机械设备运行功能的失常(*malfunclion*),并非失效(*Failure*)或损坏(*Breakdown*)。“诊断”则包括两方面内容:“诊”是对客观状态作检测;“断”则是确定故障的性质、故障的程度、故障的类别、故障的部位,说明故障产生的原因,提出对策等。现在所说的设备故障诊断技术,和传统的主要靠人的感觉器官对设备情况进行检查的方法是有区别的。

1. 状态维修的概念

大家知道,设备经过运行使用之后,性能将逐渐变差,为保证正常工作,必须及时将劣化了的性能加以恢复,这就是设备维修。在设备技术发展史上,先后经历了三种维修方式:

(1) 事后维修

按这种维修方式工作的设备,没有有效的监测措施,通常在设备运行到损坏后之进行修理,这种维修制度只适用于设备本身造价低设备事故对工艺没有大的影响这种情况。对于

现代化的生产,由于设备向大型化、高速化、自动化等方向发展,机械性能指标越来越高,设备组成和结构越来越复杂,万一发生事故,造成的损失是非常巨大的,修复也很困难,还要付出昂贵的修理费用,因此,这种维修方式已很少采用。

(2) 定期预防维修

设备按固定的周期进行维修,如定期地对设备进行清洁、润滑,有计划地更换配件等。这种维修方式,对保证设备安全运行,减少维修费用能起到一定的作用,但由于缺乏对设备故障规律的认识和没有有效的监测手段,检修周期基本上是凭人的经验加上某些统计资料来制定的,它很难预防许多由于随机因素引起的事故,而且会造成过剩维修,甚至由于维修方法不当,大拆大装的结果,反而增加了故障率。

我们可用一份国外调查资料来进一步说明这个问题。

按照定期预防维修的观点,设备在新的时候或刚修理过,其故障率是较低的,随着时间的推移,故障率会逐渐增大。当出现故障的设备数达到2%时,就应对全部设备进行修理,使98%的设备都有剩余的寿命,如不按期检修,在更短的时间内将又有2%的设备发生故障。

事实并非如此。联合航空公司(United Airlines)和美国航空公司(American Airlines)对235套机械设备(包括电机、泵类、控制系统)作了一个普查,发现只有8%的设备的故障率随时间推移按照一定的规律增加,而其余92%的设备故障率近似为一常数,见图(1-1)。其中又分三种情况:
①66%的设备在新的时候或刚修理过时具有很高的故障率,随时间推移,其值逐渐降低,最后趋于定值,对这类设备实行定期维修,反而会加速其损坏。
②15%设备的故障率是一常

数，对这类设备进行修理，不能改变其故障率。③11%设备，在新的时候或大修后故障率处于最低值，但很快即增加为一常数，对这类设备维修，可以增加其运行时间，但效果有限。综合上述三种情况说明，多数设备故障率并不随时间增加而变大，全部设备都定期进行检修是不科学的，无形中浪费了大量人力，物力，减少了运行可用时间，这是所谓的过剩维修。况且故障率是对全部设备而言，在考察单台设备的时候，我们并不知道其故障是怎样随时间变化的。采用这种方式对设备进行维修，对于预防设备事故的作用也是有限度的。

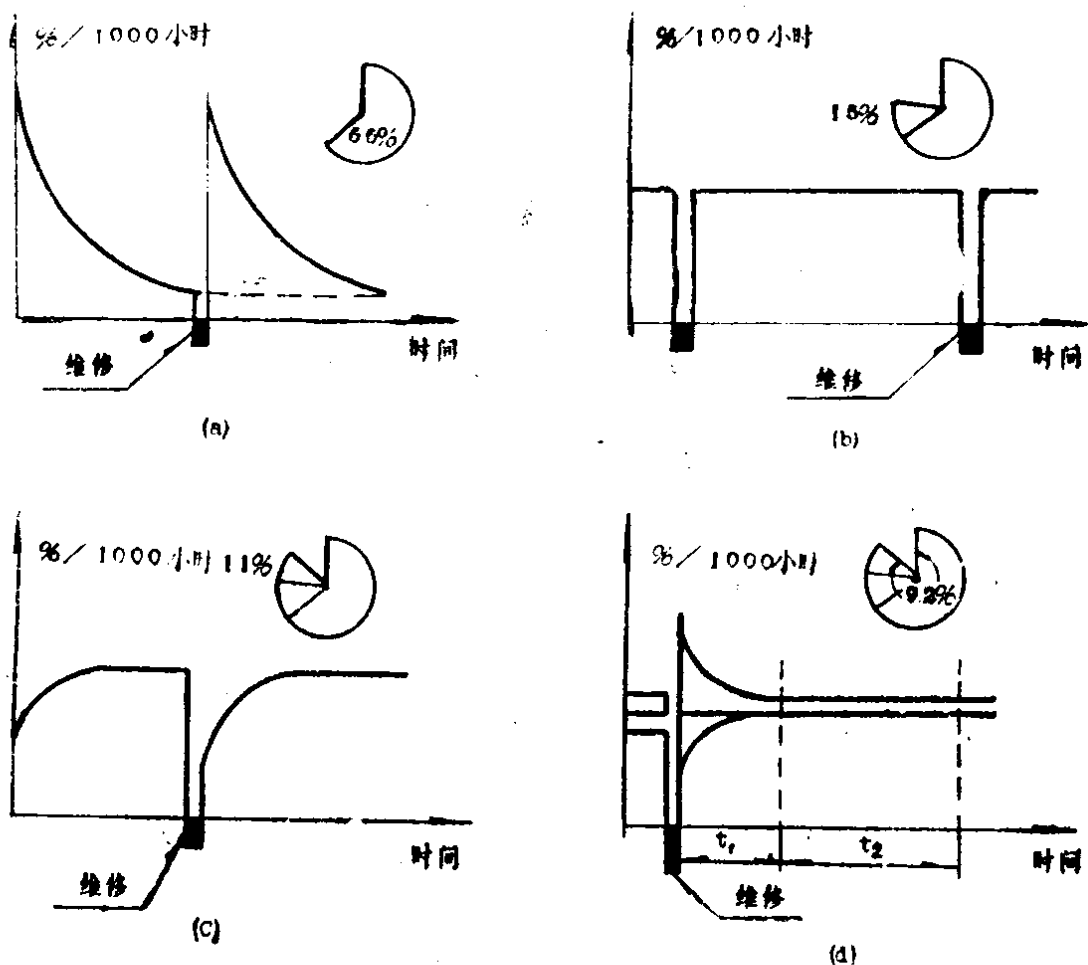


图1—1 设备运行故障率统计

(3) 状态维修

这是一种新的维修方式，曾称为预知维修。顾名思义，

实行这种维修方式，需要预先掌握设备的实际技术状态，据此决定维修工作。它的基本原则是仅当测量结果表明检修是必要的时候才进行检修，也就是说，它按“需”维修，参见图（1-2）。将定期维修变成定期检测设备的运行状态，跟踪故障的发展过程，推算设备状态超标发生的时间、就可根据设备状态劣化的程度，在故障发生前的某个时间内做好检修准备，有针对性地、有计划地安排停工修理。如果生产条件

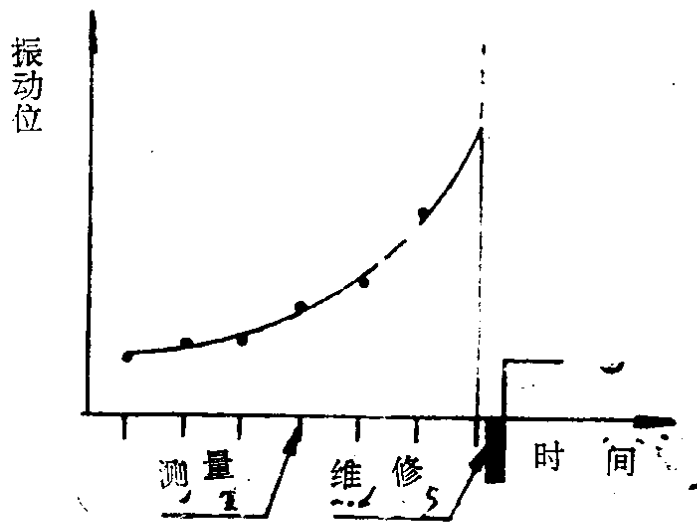


图1-2 状态维修时间的决定

不容许，也可有安排地让设备坚持运行到出现故障时再停下检修（当然，故障后果严重或对安全有重大威胁的应除外）。实行这种方式的维修制度，无论对减少备件库存量，缩短检修时间，提高检修质量或者对减少故障造成的人身事故，提高设备的有效利用率都是有好处的。

状态维修的设想，老早就提出来了，但直到最近才有可能实行。根本问题是必须准确把握设备的状态，并作科学的诊断分析。正是由于这个原因，设备故障诊断技术受到了各行各业的重视和欢迎。

应该指出，没有那一种维修方式在任何情况下都是最佳的。是否采用状态维修，需要从两方面加以考虑：第一，并

不是所有的设备故障原因都能事先测出，如果多数故障源都属于这种情况，那么状态监测就几乎不必进行了；第二，状态监测需要花费人工和资金，只有当状态监测的费用低于维修费用（劳务费、间接费）的节约额时，或者对人身安全需作特殊考虑时，采用状态监测才是值得的。

按目前各工厂的经验，实行状态监测的初次投资额占设备资产值的1%左右较为合理，如果监测对象有特殊的危险性，可提高到5%。在使用得合理的工厂中，这项费用在六个月内就可从维修费用的节约额中收回。据统计，采用设备故障诊断技术后，事故可减少75%，维修费用可降低25~50%，由此可见，以状态监测为基础的维修是比较经济的。

2. 现代化的监测诊断手段

故障诊断技术的一个特点应用了许多现代化的监测仪器和分析诊断系统。

传统的诊断方法，主要是依靠的人五官，利用触、摸、听、看等方法对机器加以诊断。通过经验的积累，人们可以获得某些判断机器何时出现故障所需的技能。这是一种宝贵的知识，即使技术进一步发展了，人的这种主观诊断在设备故障诊断中的作用也不会完全消失。但人的感官感受能力有限，加之经验的获得常常需要艰苦历程，已很难适应现代化生产设备的监测要求。

七十年代以来，随着工业生产的发展，机械设备变得越来越大，结构越来越复杂，高速化，重载化、高度自动化等等，对机器运行的可靠性提出了越来越高的要求。在这种情况下，为了掌握设备的情况，即使是技术非常熟练的工作人员，也离不开检测分析仪器的帮助了。

六十年代以来迅速发展的电子技术和计算机技术，还有快速傅里叶变换算法语言的出现，使信号分析技术从硬件得

软件都推到了一个新的高度。设备、零件的可靠性研究以及对零件失效机理的研究，为设备诊断技术的发展提供了坚实的基础，现在可供使用的仪器和监测系统，品种日新月异，从便携式仪器到成套设备、直到具有人工智能的专家系统均已出现，其性能指标、功能规格正在不断更新和扩大。这些应用现代科学理论和技术制造出来的电子仪器设备，具有许多主观监测无可比拟的优点，如灵敏度高，反应速度快，信号转换方便等等，计算机还具记忆逻辑判断能力。因此，过去靠感官无法发现的微小状态变化，现在都可准确地及时地加以测定。这样，设备故障诊断无论在项目内容、动态范围方面，还是在定量化、实时分析能力方面都达到了一个新的水平。

3. 动态诊断

故障诊断技术的另一个显著特点是它强调的是动态诊断。设备只有在运行中才能产生物理的、化学的信号，信号超过一定指标就是故障。设备停运，信号消失，有的故障就难以发现。当然，把设备解体为零、部件，采用常规的无损检测或微观检验的方法，也能发现故障的原因或小的缺陷，但这种静态诊断，一般仅可作为动态诊断的一个辅助方面进行。

综上所述，设备故障诊断就是在设备运行中或基本不拆卸设备的情况下，掌握设备运行的状态量，预测异常故障的部位和原因，以及预知对设备未来运行的影响，找出对策的一门技术，是一门很有应用前途的技术。

1.2 设备诊断技术的内容和方法

设备故障诊断是一门多学科性的综合技术，内容很丰富。

首先、设备故障诊断是根据机械设备运转过程中发生的各种各样的信息来识别和进行诊断的，或者通过对结构、机

械零件和部件进行激励，使之产生各种不同的信息来诊断其损伤情况。由于信息的多样性，实行诊断技术需要有广泛的理论基础。它不仅涉及到数学、物理、化学等基础科学，而且涉及到金属学、机械学等应用科学的知识。例如在数学方面，信息数据的采集、监测和诊断广泛地应用了微分方程、概率论和随机过程、回归分析和数理统计、误差理论、数值计算，快速傅里叶变换（FFT）和时间序列法等；在物理、力学、力学、化学方面，其理论基础直接为监测识别诊断提供方法和工具，应用范围更为宽广，如物态特性的利用、光谱分析、热探技术和红外技术、噪声分析、超声波技术、射线技术、电测技术、涡流特性识别技术、振动诊断技术、铁谱分析等等。

其次，由于机器在装配后和在运行过程中往往无法对它的关键零件直接测试，例如无法直接测量轴承的游隙和磨损量，无法直接检测关键零件裂纹的发生和扩展等。在故障诊断中虽然有多种多样的检测监视手段，但都只是间接地判断机器运行状态，属于间接测量之列。这样，当用这些间接测量得到的信息来判断机器运行状态的特征时就带有某些“不确定性”，因此，必须有一套正确的识别理论。

第三，从判断的逻辑思路来看，必须将故障征兆加以分类，并和故障机理联系起来。

在诊断技术中，产生异常及故障的原因称为应力（如温度、振动所产生的热应力、动应力等），应力加以定量化则称为参数，而异常及故障的表现叫做征兆、征兆的特点叫模式。

在医学中、为了诊治疾病，必须先对症状进行分类（如发烧、疼痛），弄清疾病的类别（如肺炎、胃溃疡）和程度（急症、慢性病）而后才能进行治疗。