

985341

高等学校试用教材

机械工况监测与 故障诊断

(船舶机械、
工程机械专业用)

武汉交通大学
萧汉梁 主编



人民交通出版社

高等学校试用教材

机械工况监测与故障诊断

(船舶机械、工程机械专业用)

武汉华中科技大学
萧汉梁 主编

人民交通出版社

(京)新登字 091 号

内 容 提 要

本书阐述机械工况监测故障诊断技术的基本原理,着重介绍振动及油液监测这两种行之有效的诊断技术,并介绍这些技术在常用机械及结构故障诊断中的应用。全书共十二章。

本书为船舶机械专业及工程机械专业本科生的教材,亦可用作高等学校其他机械类专业本科生和研究生的教学参考书,亦可供工交企业从事机械设备维护管理工作的工程技术人员阅读参考。

高等学校试用教材

Jixie Gongkuang Jiance Yu Guzhang Zhenduan

机械工况监测与故障诊断

(船舶机械、工程机械专业用)

武汉交通科技大学

萧汉梁 主编

插图设计:陈春琳 正文设计:刘晓方 责任校对:尹静

人民交通出版社出版

(100013 北京和平里东街10号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

顺义牛栏山印刷厂印刷

开本:787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张:11.75 字数:289千

1994年11月 第1版

1994年11月 第1版 第1次印刷

印数:0001—1500 册 定价:5.50元

ISBN 7-114-01900-9

U·0126C

前 言

本书根据交通部教育司计划,按照专业教材的基本要求和本课程教学大纲,在讲义的基础上,结合教学工作的实践和科学研究的成果进行编写的。

机械工况监测与故障诊断技术是一门新兴的综合性学科,近年来在工交企业中,日益受到重视和应用,并列为船舶机械专业及工程机械专业的专业课程之一。多年来的教学实践表明,这门课程符合科学技术发展和专业工作的需要。

本书包括故障理论、监测诊断技术、典型机械及零件故障诊断三部分,阐述了机械工况监测及故障诊断技术的基本原理,并着重介绍振动及油液监测这两种行之有效及应用广泛的技术,本书还安排一定篇幅介绍这些技术在常用机械及结构故障诊断中的应用,并阐述了当前故障诊断技术的发展动向,特别是计算机技术在监测诊断中的应用。本书在编写中,内容力求反映本课程多学科的特点,强调理论联系实际;文字上力求通顺简练,概念定义明确,名词术语符合国家标准,计量单位采用法定计量单位。本书适用于40学时左右的教学要求。除可作为船舶机械专业及工程机械专业本科生的教材外,还可作为高等院校其他机械类专业和研究生的教学参考书,亦可供工交企业机械设备维护管理人员阅读参考。

参加本书编写工作的有:武汉交通科技大学萧汉梁(第一、二章),周强(第三、十章),严新平(第四、五、六、七、九章),朱新河(第八章),赵章焰(第十章),刘永健(第十一章),孙世基(第十二章)。本书由萧汉梁主编。

本书由中国科学院院士、华中理工大学校长杨叔子教授主审,并提出了宝贵意见。

编写本书的资料,一部分参阅有关书籍和科技成果,一部分来自生产、科研实践,在此谨向提供资料的单位和个人表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中谬误和欠妥之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者 1993年8月

2A90/12

目 录

第一章 概论	(1)
第二章 机械故障	(4)
第一节 故障的概念	(4)
第二节 故障分类和规律	(4)
一、故障的分类	(4)
二、故障规律	(6)
第三节 故障分布模型	(7)
一、威布尔型故障分布	(7)
二、指数型故障分布	(9)
三、伽玛型故障分布	(10)
四、正态型故障分布	(11)
第四节 故障模式	(11)
一、定义和分类	(11)
二、常见的故障模式	(13)
第五节 故障机理	(14)
第三章 振动噪声监测	(16)
第一节 振动噪声监测的仪器设备	(16)
一、简易检测仪器	(17)
二、精密测试仪器	(17)
三、信号分析仪器	(21)
四、振动监测中的几个问题	(23)
第二节 时域诊断	(24)
一、均值	(25)
二、均方根和方差	(25)
三、概率密度函数	(26)
四、自相关函数和互相关函数	(27)
五、幅值参数诊断法	(30)
第三节 频域诊断	(31)
一、自功率谱密度的基本概念	(31)
二、自功率谱密度的估计	(32)
三、自功率谱诊断应用	(39)
第四节 倒频谱诊断法	(46)
一、倒频谱的基本原理	(46)

二、倒频谱诊断法的应用	(47)
第五节 时序模型诊断法简介	(48)
一、时序模型诊断法的概念	(48)
二、自回归模型和自回归谱	(49)
三、自回归模型在设备故障诊断中的应用	(52)
第四章 油液分析	(56)
第一节 概述	(56)
第二节 取样	(57)
一、取样时刻	(57)
二、取样点	(58)
三、取样周期	(58)
四、取样方法	(59)
五、取样记录	(59)
第三节 油样物理化学指标检测	(59)
一、目的	(59)
二、方法	(59)
第四节 油料光谱分析	(61)
一、原理	(61)
二、方法与仪器	(61)
第五节 磁塞检测	(64)
一、原理	(64)
二、磁塞的结构	(64)
第六节 铁谱监测技术	(66)
一、原理	(66)
二、仪器	(66)
三、铁谱技术的分析方法	(72)
四、磨粒种类及特征	(74)
第五章 温度监测	(92)
第一节 概述	(92)
第二节 接触式测温	(92)
一、基本原理	(92)
二、方法与仪器	(93)
第三节 非接触式测温	(94)
一、概述	(94)
二、红外测温仪	(96)
三、红外热成像系统	(98)
四、红外检测技术的应用	(99)
第六章 性能参数监测	(102)
第一节 概述	(102)
第二节 监测参数的选择	(102)

一、选择监测参数的要求	(102)
二、监测参数的分类	(102)
三、监测参数的确定方法	(103)
第三节 性能参数监测法的应用	(104)
一、叶片和喷嘴积垢引起的汽轮发电机组故障	(104)
二、外界污染物颗粒引起汽轮发电机组故障	(105)
第七章 无损检测技术	(107)
第一节 概述	(107)
第二节 常规无损检测方法	(108)
一、超声波探伤法	(108)
二、射线探伤法	(110)
三、渗透探伤法	(110)
四、磁粉探伤法	(111)
五、涡流探伤法	(112)
第三节 声发射监测技术	(112)
一、原理	(112)
二、声发射监测的特点	(113)
三、声发射检测系统的基本构成	(114)
第八章 计算机辅助诊断	(116)
第一节 概述	(116)
一、计算机在监测和诊断中的应用现状	(116)
二、计算机监测和诊断系统的分类	(116)
第二节 计算机监测和诊断系统的构成	(117)
一、连续监测诊断系统	(118)
二、定期监测诊断系统	(120)
第三节 计算机在故障监测与诊断中的应用实例	(120)
一、计算机在振动监测中的应用	(120)
二、计算机在性能趋势监测中的应用	(121)
三、故障诊断专家系统	(122)
四、计算机在油液监测中的应用	(123)
第四节 计算机监测诊断系统的设计要点	(125)
第五节 发展动向	(126)
一、神经网络技术在故障诊断中的应用	(127)
二、模糊诊断	(127)
第九章 内燃机故障诊断	(129)
第一节 概述	(129)
第二节 内燃机故障型式	(130)
一、内燃机零部件负荷特点	(130)
二、内燃机零部件的故障型式	(130)
第三节 内燃机故障诊断技术	(131)

一、直观检查法	(132)
二、温度监测法	(132)
三、性能参数监测法	(132)
四、振动监测法	(133)
五、油液监测法	(135)
六、小结	(135)
第四节 内燃机故障诊断的应用实例	(135)
一、燃气轮机故障的振动诊断	(135)
二、柴油机故障的振动诊断	(136)
三、柴油机故障的铁谱诊断	(137)
第十章 机械零部件故障诊断	(140)
第一节 滚动轴承故障诊断	(140)
一、滚动轴承的结构型式	(140)
二、滚动轴承故障的基本形式	(140)
三、滚动轴承的振动监测	(141)
四、滚动轴承振动监测的实施方法	(144)
第二节 齿轮振动诊断技术	(144)
一、齿轮和齿轮箱的失效形式和原因	(144)
二、齿轮和齿轮箱的振动机理	(145)
三、齿轮的故障诊断	(150)
第三节 转轴组件的振动监测	(154)
一、转子振动分类	(154)
二、转子故障原因	(154)
三、转轴组件故障分析	(155)
四、转轴平衡技术	(157)
第十一章 液压系统故障诊断	(160)
第一节 概述	(160)
第二节 液压系统的故障预兆	(160)
一、液压系统的工作压力失调	(161)
二、振动与噪声	(161)
三、气穴及气蚀	(161)
四、液压系统温升过高	(162)
五、液压系统泄漏	(162)
第三节 液压系统故障诊断及实例	(162)
一、“四觉”诊断法	(163)
二、液压系统图分析检测法	(163)
三、液压系统测试仪诊断法	(164)
第十二章 结构故障诊断	(167)
第一节 参数识别法	(168)
一、用最小二乘技术	(170)

二、用卡尔曼滤波	(170)
三、用自适应滤波	(171)
第二节 时序分析法	(171)
一、运动方程的建立	(171)
二、应变与位移振型相对于裂纹变化的敏感度	(175)
三、振动系统的时序建模及故障检测	(176)
参考文献	(177)

第一章 概 论

随着国民经济的发展和科学技术水平的不断提高,机电设备日益向高效率、高精度和自动化方向发展,它们的功能增多、性能参数提高、工作强度加大、结构更复杂。一方面提高了生产率,降低了成本,另一方面机电设备发生故障所造成的经济损失和社会影响也是非常巨大。国内外出现在这方面的事故已不是少数。为了保证设备的安全运转,降低维修成本,必须对机电设备实施工况监测和故障诊断。

设备工况监测和故障诊断技术(简称设备诊断技术)是一门了解和掌握设备在使用过程中的状态,确定其整体或局部是正常还是异常,早期发现故障及其原因,并预报故障发展趋势的技术。设备诊断技术历史悠久,从人类学会利用机械设备进行生产的时候起就有了手摸、耳听以及使用一般仪器仪表测试的简易诊断手段。随着生产技术的进步,诊断技术也在进步,到本世纪60年代末,由于电子技术及微型计算机的迅速发展,诊断技术水平也就从原来的简易阶段发展到现代的科学阶段——精密诊断阶段。到70年代以后基本形成独立、完整的体系,出现了一个划时代的变化。诊断技术是应用现代化科学技术成就,为社会服务的综合性学科。在实际诊断中,既会采用传统简易手段,也采用新的精密诊断手段,两者长期并存的局面。

设备诊断技术是利用被诊断的对象所提供的一切信息,经过分析处理获得能用于识别设备状态的特征参数,最后做出正确的诊断结论。它所提供的信息技术通常包括三个基本内容:

1. 信息的采集——这里的关键是正确选用传感器,如温度传感器、振动传感器等,人的感官也是一种特殊的传感器、传感器的性能和质量是决定信息是否会失真或遗漏的关键。

2. 信息分析处理(数据处理)——目的是把原始的杂乱的信息加以处理,以便获得对故障最敏感的性能参数,称为特征提取。在用人的感官作传感器时,是在人的大脑中对信息进行分析处理的。在现代诊断技术中,信息大多是用专门的电子仪器或计算机来分析处理的。

3. 状态识别、判断和预报——根据特征参数,参照某种规范,利用各种知识和经验,对设备状态进行识别、对早期故障进行诊断,并对其发展趋势进行预测,为下一步的设备维修决策提供技术依据。

开展设备诊断工作还必须具备两方面的基础知识:

1. 关于设备及其零部件故障或失效机理方面的知识,国外称之为故障物理学。

2. 关于被诊断设备的知识,包括它的结构原理、运动学和动力学,以及设计、制造、安装、运行、维修等方面的知识。可以说,没有对被诊断对象的透彻了解,即使是一位信息分析技术的专家,也很难做出正确的诊断结论。

设备诊断技术,根据不同的技术特点,可分为直观检查法,性能参数分析法,振动、噪声分析和油液分析法等。

1. 直观检查法

由检查人员用目力或通过仪器观察零件表面的磨损及缺陷情况。直观检查法有以下四种:

- 1) 光学观察法 借助光学显微镜及工业内窥镜,光学仪器来检查;

- 2) 频闪仪法 利用频闪仪可对转动的零件外表面进行观察;

3) 着色渗透法;

4) 温度测量法 利用接触式或非接触式测温仪器测量机械或零件的温度来进行监测。

2. 性能参数分析法

利用各种仪器或仪表测定设备的各项性能参数值(如温度、压力及流量等),将这些数据进行处理,比较和分析以判断机械设备的运行状况和趋势。这种方法可利用被监测设备已配置的各种仪表,投资少,并且已发展成在线多点自动监测,因此此法在技术上行之有效,并很有发展前途。

3. 振动、噪声分析法

机械的振动和噪声是机器运行过程中的一种属性,即使是最精密的或最先进的机械,亦不可避免地,以其自身的结构特点产生振动和噪声。而振动和噪声的增加和变化,一般是由于某种故障所引起。因此,采集、分析和研究机械零部件所发生的振动分噪声的特征和机理,就可以对机器的运行状态进行诊断。这种方法是最基本的监测诊断方法之一。

4. 油液分析法

油液分析法(又称油液监测技术)是通过采集机械设备的在用润滑剂样品(包括润滑油、润滑脂和液压系统介质等),利用各种分析手段,分析样品的性能和样品中的磨损微粒,从而评价被监测机械的磨损状态并预测其发展趋势。油液分析法是一种应用广泛和有效的监测诊断手段,它包括润滑剂性能衰败分析和磨损微粒分析两类。润滑剂性能衰败分析是根据在用润滑剂的理化性能,通过确定机械的润滑状态来诊断因润滑不良引起的故障。常用的方法有:定性简易检测、定量指标检测和综合指标检测。磨损微粒分析是,通过分析在用润滑剂中磨损微粒的形貌,数量、尺寸与成分来诊断被监测机械的磨损状态与故障,常用的方法有:光谱油料分析、铁谱监测技术、磁塞检测、颗粒计数法和滤纸监测法。

除了上述四种监测诊断方法以外,还有声发射检测、应力应变测量和无损检测等方法,这些方法亦有广泛的应用。

表 1-1 所示为目前已经开发和正在开发的一些诊断技术及其应用范围,可供了解参考。

设备诊断技术开发情况

表 1-1

类别	主要诊断对象	诊断技术举例	类别	主要诊断对象	诊断技术举例
机械零件	滚动轴承 滑动轴承 齿轮	振动噪声监测 电阻法 温度监测 油液分析	加工机械	机床 剪切机 焊接设备	振动噪声监测 负载电流测定 火花检测法
传动系统	传动轴系 高速旋转件 轮轴	振动噪声监测 声发射技术 模态、分析	静态设备	压力容器 结构件 管道系统	声发射技术 X射线探伤 超声探伤 阻抗法 红外热像技术 腐蚀监测
流体机械	水利机械(水泵等) 液压机械(泵油缸、阀) 气动机械(空压机、风机)	振动噪声监测 压力脉冲法 超声波监测 温度监测 效率测定	电机电器	电机 电缆 变压器	振动噪声监测 电流分析法 绝缘诊断法 整流监测法 气相分析
动力机械	发动机 涡轮机 液压马达	振动噪声监测 气流轨迹分析 效率测定 气体分析 压力脉冲法	控制系统	电机控制系统 液压控制系统 检测系统	卡尔曼滤波法 传递函数法 系统辨识法 统计控制理论 可变量解析法

设备工况监测与故障诊断二者既有联系又有区别。工况监测(又称状态监测)通常是指通过测定设备的某个较为单一的特征参数(例如振动、温度等),来检查其状态是正常或异常。当特征参数小于允许值时便认为是正常,否则为异常。并以超过允许值的大小表示故障严重程度。当它达到某一设定值(极限值)时,就应停机检修。若对设备进行定期或连续监测,便可获得设备故障发展的趋势性规律,对剩余的寿命作出估计,借此便可进行预测。这是国外较为普遍采用的有效方法,称趋势分析,可由计算机来完成,称为自动监测系统。一般讲,设备状态监测所用的仪器比较简单便宜,易于掌握,对人员素质要求不高,只要恰当地加以组织,一般都能取得效果,适合由车间一级来组织实施,所以状态监测又称为简易诊断。故障诊断技术则不仅要检查设备是否正常,还要对设备故障的原因、部位以及严重程度进行深入分析,做出判断,故它又称为精密诊断。精密诊断常需要较精密的电子仪器,不仅价格昂贵,有时还需引进专门仪器,对人员素质要求也比较高,属正在发展中的技术,不如简易诊断成熟和简便易行,因此只在重大设备上进行。

设备故障诊断技术最适用于以下各种设备:

1. 生产中的重大关键设备,包括没有备用机组的大型机组。
2. 不能接近检查,不能解体检查的重要设备。
3. 维修困难、维修成本高的设备。
4. 没有备品备件或备品备件昂贵的设备。
5. 从人身安全、环境保护等方面考虑,必须采用诊断技术的设备。

实践表明,当前应推广简易诊断,并与设备点检制等设备管理制度相结合,可以收到明显的效果。由于投资,技术水平等因素,应该有针对性地逐步开展精密诊断工作。

第二章 机械故障

第一节 故障的概念

机械故障是结构、机器或机械零件在尺寸、形状或材料性质方面的改变,这些变化会使结构、机器或机械零件不能达到原设计所要求的功能或者改变其原有的各种参数。

机械在使用过程中受到各种能量的作用,这些能量会影响机械的工作能力。它们是:

1. 机械能 在机械工作过程中,机械能不仅沿着各个机件传递,且因为和外部介质发生相互作用,而以静载荷或动载荷的形式对机械产生作用。这些载荷都是时间的随机函数,而且与复杂的物理现象有密切的联系。

2. 热能 周围介质温度发生变化和机械在运转中发生的热量,对机械和零件会产生作用 and 影响。

3. 化学能 化学能同样对机械的工作产生影响,甚至会直接破坏机械的部分零件。

4. 核能 原子核裂变过程中释放出的核能可对材料产生作用,并改变其性质。

5. 电磁能 电磁能以无线电波的形式干扰电子设备的工作。

6. 生物因素。

这些因素也在机械的零件中也会引起一种使产品参数降低的过程。这些过程一般都和复杂的物理-化学现象紧密相连,并使零件发生变形、磨损、断裂、腐蚀等,结果引起输出参数变化,最后导致故障发生。

第二节 故障分类和规律

一、故障的分类

故障的分类不仅可以揭示和分析故障的实质,也有利于选择适当的诊断手段。故障的分类方法很多,从不同的角度可以进行不同的分类,但它们彼此又相互交叉。

1. 按故障的后果对机械工作能力的影响分类

1) 完全性故障 由于故障导致机器丧失主要功能,工作完全中断。

2) 局部性故障 由于故障导致机械丧失部分功能,但还能够继续使用。

2. 按故障发生的速度及演变过程分类

1) 突发性故障 由外界随机因素或材料内部潜在缺陷引起的突发性故障,故障的概率往往与工作时间无关,事先没有明显的征兆,往往来不及监测预报。

2) 渐进性故障 机器中某些零件长期使用,某些零件的技术指标超出标准极限范围而引起的故障。这类故障占全部故障的绝大多数,可以通过监测而获得预报。

3. 按故障发生性质分类

1) 人为故障 由于操作人员未按规定操作、维修或管理不当而造成的故障。这种故障往往被忽视,而实际上它还是占有一定的比例。

2) 自然故障 由于机械的使用环境恶劣,材料结构的缺陷或加工装配不合理等因素所造成的故障。

4. 按故障发生的时期分类

- 1) 早期故障
- 2) 使用期故障
- 3) 老化期故障

5. 按故障的相关性分类

1) 非相关故障 机械零件的故障,不是由于其它零件的故障所引起的称为非相关故障。

2) 相关故障 它是由于机械的其他零件的故障所引起的,因此也称二次故障。例如,由于滑油泵的故障使润滑油中断流动,而使曲轴主轴瓦粘着(咬死),则主轴瓦的故障属于相关故障。在机械故障中有大量的相关故障,因此在查找故障的原因时,必须注意分析相关因素。

根据不同的故障分类,可以分类统计机械的故障数量,从而了解机械故障的分布特点,并对机械的设计、制造和维修使用提供有价值的信息。表 2-1 所示是对 1700 台工业用汽轮机故障数据的统计表,表 2-2 所示是 5 艘柴油机油船各类机械故障数量统计表;表 2-3 是船舶柴油机动力装置及主要零件故障统计表;由以上各表可以从总体上分析故障分布情况,有助于抓住关键,寻求对策。

汽轮机故障统计表

表 2-1

	故障原因	分布率(%)		故障原因	分布率(%)		故障原因	分布率(%)
产品原因	设计	20.4	运行原因	使用 维修	10.7 8.4	外界原因	异物 其他	6.3 4.8
	安装	16.5						
	材料	9.1						
	工艺	7.5						
	制造	12.5						
	调试	3.8						

柴油机油船各类机械故障统计表

表 2-2

原因 \ 机械名称	主机	锅炉	发电机	机舱辅机	管系	电动机	甲板辅机	计量仪表	自动机器	合计
设计不良	19			3			1		2	25
材质不良	83	1	24	16	14		11	2	9	160
安装装配不良	35	3	8	11	4	3	3		5	72
加工不良	25		8	4	10	3	7	5	4	66
自然损耗	49	5	4	28	16	4	12		13	131
腐蚀	47	2	6	13	62		16	2	5	153
污损	136	4	11	41	5	10	15	3	31	256
振动	52	13	12	15	37	11	17	10	38	205
使用不当	2				1	3	3		1	10
合计	448	28	73	131	149	34	85	22	108	1078

注: 本表引自桥本武《船用机关シスラムの信頼性设计与保全性管理に关す为研究》,P,32 表 1-12(a)

船舶柴油机动力装置及主要零件故障统计表^[5]

表 2-3

编号	分类	数目	百分比(%)	编号	分类	数目	百分比(%)
1	轴承	283	25.3	14	压缩机	15	1.3
2	气缸活塞	206	18.4	15	冷却系统	12	1.0
3	燃烧室	130	11.6	16	推进器	10	0.9
4	燃油系统	66	5.9	17	曲轴	9	0.8
5	涡轮机	56	5.0	18	增压器	9	0.8
6	传动齿轮	41	3.7	19	标准件	8	0.7
7	辅助锅炉	39	3.5	20	连杆	6	0.54
8	辅助装置	28	2.5	21	排气系统	6	0.54
9	凸轮机构	24	2.2	22	仪表	5	0.45
10	热交换器	21	1.9	23	锚机系统	5	0.45
11	润滑系统	18	1.6	24	密封件	5	0.45
12	机座	33	3.0	25	液压系统	3	0.27
13	泵	18	1.6	26	其他	62	5.6

二、故障规律

在机械使用的全过程中,机械及其零部件发生故障的次数是不同的。按故障发生的时期可以将机械使用的全过程分为早期故障期,随机故障期和磨损故障期三个阶段。在这三个不同的时期,故障发生的次数(故障率 λ)和变化规律是不同的,大量的现场使用和试验结果表明,典型机械的故障率与使用时间的关系可用“浴盆曲线”(即故障率规律曲线)表示(图 2-1)。

1. 早期故障期

又称磨合期,它出现在机械开始工作的初期。其特点是:故障率较高,但随着工作时间的增长而迅速下降。早期故障主要是由于设计、制造中的缺陷或者由于操作不熟练与使用环境不适应,例如设计欠周到、使用材料不合适、装配不当、磨合不协调、质量检验不认真等所引起。通过试车调试、磨合、更换有缺陷的零件,故障率很快下降,并趋向稳定。

2. 随机故障期

又称偶然故障期,它出现在早期故障期之后,其特点是:

- 1) 故障率低而稳定,近似于常数,与使用时间关系不大;
- 2) 所出现的故障是偶然因素引起的随机故障,它是设计、制造中潜在缺陷,操作差错,维护不良,环境影响等因素所致,所以不能通过调试来消除,也不能通过定期更换部件来预防;
- 3) 随机故障期一般比较长,是机器的使用期限。

3. 磨损故障期

它出现在机械寿命的后期,其特点是故障率随着使用时间增长而迅速上升,维修费用增长

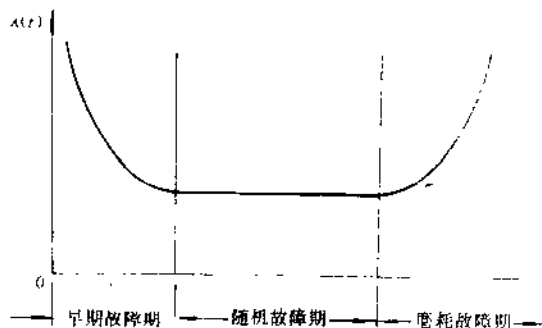


图 2-1 浴盆曲线

而工作效果也越来越差。磨损故障是由于机械本身的物理或化学等变化所引起的磨损、疲劳、腐蚀等现象而引起的。

统计分析表明,并不是所有的机电产品的故障规律都符合浴盆曲线;它们分别符合六种曲线分布规律(图2-2)。在该图中,曲线A是浴盆曲线,曲线B示出明显的损耗期,曲线A、B通常都能表示机械磨损,材料老化和金属疲劳等特点,符合往复式发动机的气缸,曲柄连杆机构,齿轮传动机构,轴承、轮胎及船体板等零部件的故障规律;曲线C没示出明显的损耗期,但是随着运转小时的增加,故障率缓慢增加,它符合航空涡轮发动机的故障规律;曲线D、E、F表明在产品的整个使用期中,故障为常数,它们适用于电子产品的故障规律。

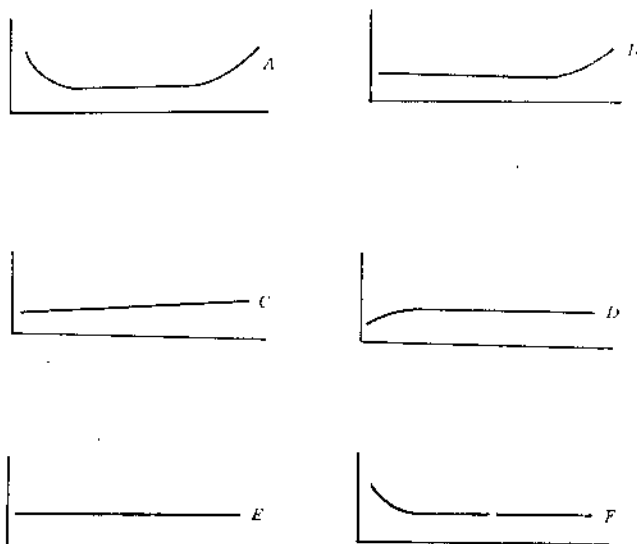


图 2-2 各种典型故障率曲线

第三节 故障分布模型

机电设备是个复杂的系统,各个子系统,各个零部件的故障模式不胜枚举,其故障机理出十分复杂,但是从故障所占有的空间、时间角度归纳,不外乎正态分布、指数分布、威布尔分布、对数正态分布、伽玛分布等常见的概率模型;从故障的物理、化学、力学性质角度来归纳,也不外乎应力——强度模型、最弱环模型、退化模型、累积损伤模型等常见的物理模型。前者定量地分析故障特征,后者定性地分析故障机理,它们从不同途径描述产品的寿命分布,它们之间存在着一定的内在联系。也就是说,故障机理的特征有助于故障分布模型的判别,而故障分布模型的特性有助于故障机理的分析。

本节阐述常用的几种故障分布模型,由于它们之间存在一定的关系,因此在大多数情况下,要指出某种故障单纯属于哪一些分布模型是困难的。

一、威布尔型故障分布

1. 物理模型——最弱环模型

如果产品由若干个独立部件串联构成,只要其中某个常发故障的部件发生故障,就会引起整体故障,犹如链条断裂一样,断口所在的环称为最弱环,最弱环的寿命就是整个产品的寿命。或者说,最早出现故障的环的寿命就是产品的寿命。

最弱环故障的出现应是随机的,因为有的环可能对热辐射耐力弱一点,有的可能机械强度弱一点,弱点不一定都集中在一个环上。当各种环境应力随机作用在各个环上时,例如较强的机械应力碰巧作用在对它抗力较弱的环上,就会出现疲劳、断裂、弯曲等故障,形成最弱环。又如较高热辐射作用在某个耐热较差的部件上,就会出现烧坏、参数漂移、性能明显下降等故障,也成为最弱环型故障。最弱环故障的部位通常发生在对整机具有交配性的关键部件上,它是造

成整机故障的常发故障源。

最弱环型的故障分布通常服从威布尔分布。

2. 威布尔分布特征

威布尔分布是一种随时间变化带有极值的函数,与实际故障情况较接近,所以经常被采用来表现损耗故障。另外,这种分布可以用一种概率纸方便地按图解法求出分布函数的各参数,所以在可靠性工程中广泛地采用。

威布尔分布的故障密度函数可用下式表示

$$f(t) = \frac{m}{a} t^{m-1} e^{-\frac{t^m}{a}} \quad (2-1)$$

用威布尔分布表达的可靠度函数 $R(t)$ 和故障率函数 $\lambda(t)$ 分别为

$$R(t) = \int_t^\infty f(t) dt = e^{-\frac{t^m}{a}} \quad (2-2)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{m}{a} t^{m-1} \quad (2-3)$$

式中: $f(t)$ ——故障密度函数;
 $R(t)$ ——可靠度函数;
 $\lambda(t)$ ——故障率函数;
 t ——运行时间;
 m ——形状参数;
 a ——特征寿命参数;

若将式(2-2)、(2-3)的 a 定为 1,可以画出不同 m 值条件下的 $f(t)$ 、 $R(t)$ 、 $\lambda(t)$ 曲线,如图 2-3 所示。从式(2-1)和式(2-3)及图 2-3 曲线的特征,可以看出如下规律:

当 $m < 1$ 时,威布尔分布表现早期故障;

当 $m = 1$ 时,表现为指数分布的偶然故障;

当 $m > 1$ 时, $f(t)$ 有极值,表现损耗故障。

这就组成了浴盆曲线。

另外,还可以看出,随着 m 值的增加,故障密度函数逐渐呈对称形,趋于正态分布。

3. 适用范围

由于威布尔分布的参数众多,指数分布、正态分布、瑞利分布等均可看作它的特例,所以适用范围甚广。德国、日本等国家常把它作为机械产品和电子产品的通用故障分布,每当遇到故障特征不很明显和难以分析判断时,就当作威布尔分布进行统计检验或用威布尔概率纸目测图估,往往取得成效。但是我们提倡按故障的物理表征和分布特性来分析它的适用范围。一般说来,威布尔分布适用于如下场合较多。

1) 串联结构中,如果存在常发故障的串联元,它在校强的外应力随机作用下,首先发生故障。

例如,锚链系统、管阀系统、动力传动系统的故障,可以考虑是威布尔型分布。但是,并非所有串联结构的故障都是威布尔型,还要看它有无常发故障源。

2) 非串联结构中,由于各部件故障间相互关联密切,通过传播蔓延而致故障的。

例如球轴承,由表面下的细小裂缝向表面传播引起疲劳失效,由部分钢球碎裂导致其他钢球过载引起轴承故障。

3) 由磨损积累、疲劳积累、损耗积累逐渐老化的渐进性故障。