



机械故障诊断学

屈梁生 何正嘉 编著

上海科学技术出版社

机械故障诊断学

屈梁生 何正嘉 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书内容分为机械系统动态信息处理和状态识别、典型机械零部件的故障监测以及诊断技术三部分，共十二章。适合作为高等学校各类机械专业(如石油化工、冶金、矿山、发电设备、交通运输设备、农业机械、轻工业机械以及一般机械制造等)本科学生和研究生的教学参考书，亦可作为工厂企业机械设备维护保养人员进行设备管理和开展机械故障诊断工作中的参考用书。

机 械 故 障 诊 断 学

屈梁生 何正嘉 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海中华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 12 字数 286,000

1986 年 12 月第 1 版 1986 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—7,200

统一书号: 15119·2500 定价: 2.25 元

前 言

近代科学技术的各门学科的发展是互相渗透、互相促进的。一方面,某些工程技术,诸如精密机械、电子技术的发展推动了医学的进步;另一方面,某些工程学科则从医学中吸取营养而得到发展。例如,人体内部器官疾病的诊断,不需要对每个病人都做剖腹检查,而只求医生根据症状或“状态”来做诊断,由局部推测整体,由现象判断本质,由当前预示未来。

将医疗诊断中的这样一些基本逻辑思想,推广到工程技术中来,就形成了工程诊断学。工程诊断学是一门很有希望的学科。在工程技术中,由局部推测整体、由现象判断本质,由当前预示未来的问题是屡见不鲜的。例如,显象管生产,我们可以并不困难地制定显象管的一系列质量指标,在出厂时进行考核,但如果我们进一步要求显象管的使用寿命达到多少小时,并且要求出厂时剔除估计寿命达不到标准的显象管;或者要求显象管在使用若干小时后,其质量不低于某一技术指标;这样的问题就涉及工程诊断中的状态识别问题了。再如,对精密滚动轴承进行验收,或者对在长期运行状态下的滚动轴承进行检查。由于我们不可能将这些轴承一一拆开,分别检验它们的内外圈、保持架和钢球,去找出它们缺陷的性质和所在位置,而必须采用比较科学的方法根据它们在运行中发出的噪声来判断。这是由于噪声携带了轴承状态的大量信息,可以用来正确识别轴承的状态。其他诸如变速箱、液压系统、转轴组件等的工作状态也都有工程诊断问题。

工程诊断问题是由现代机器及其零部件的高度可靠性要求和需要及时排除故障而提出的,许多要害工业部门,已逐渐发展了机器状态的监视和控制技术,即利用机器在运行过程中的二次效应来诊断机器的状态。所谓二次效应,就是指机器在运行中出现的现象,如温升、噪声、润滑油状态、振动,以及各种性能指标等等。因此,深入研究这些现象,发展完善的测试技术,逐步建立完善的诊断理论,是十分必要的。

国外最早发展的、用于电子计算机的故障诊断技术,现在已逐步推广到了其他行业。近年来采用的由计算机网络形成的DCS系统(Diagnostic Communication System,诊断通信系统),来对复杂的加工中心进行监视,就是其中一例,这是一个值得注意的动向。

1979年以来,在中国设备管理协会大力支持下,作为协会的团体会员单位,西安交通大学机械监测与诊断研究室为本校机械类专业的学生和研究生开设了机械故障诊断学课程。随着机器状态监测和故障诊断技术在我国生产中迅速推广,近年来又开始为一些城市的工程师进修班讲授这一门课程,所采用的讲义,获得了学校的优秀教材奖。本书就是在油印讲义的基础上经过修改和充实写成的。书中一些实例,来自国内生产和编者所参加的实验研究工作。作为机械故障诊断学的理论基础,机械图象的分析、处理和识别在本书中占了相当大的篇幅,其中有少量的内容,需要较深的数学基础,对部分工程技术人员来说,可以略去,不会影响到对以后章节的理解。

书末附有我室编制的机械监测与诊断常用的FORTRAN程序目录23个,这些程序已在我国机械故障诊断的计算机应用中发挥作用。

编者感谢近年来西安交通大学机械制造和微型技术两个教研室的一些教师的支持和帮助, 以及同学们对这门选修课程的热情和兴趣; 也感谢广大工厂、研究单位的工程技术人员对这一新兴学科的支持和关怀。本校反应堆教研室朱继洲同志特为本书编写了故障树分析部分, 谨表谢意。

书中不免有所疏漏, 恳请读者指正。

编者 1984年3月于
西安交通大学机械监测与诊断研究室

目 录

第一章 概述	1
§ 1 机械故障诊断学的内容和方法	1
§ 2 诊断信息的来源和获取	2
§ 3 机械故障诊断的几种类型	3
§ 4 机械故障诊断技术的现状和发展	4
第二章 机械图象分析基础	6
§ 1 时域分析方法	6
§ 2 频域分析方法	12
§ 3 脉冲响应与传递函数	16
§ 4 时域与频域的转变	18
第三章 机械图象的建模和识别	22
§ 1 时序模型的概念	22
§ 2 自回归模型的性质和系数、阶次的确定	23
§ 3 自回归谱的概念和应用	26
§ 4 机械图象的识别	30
§ 5 主分量分析	36
§ 6 判别分析	38
第四章 机械图象处理的一些特殊方法	47
§ 1 时域平均方法	47
§ 2 倒频谱分析方法	50
§ 3 自适应除噪技术	56
第五章 转轴组件的振动监测技术	61
§ 1 转轴组件的振动剖析和限值	61
§ 2 转轴组件振动原因的识别	69
§ 3 现场平衡技术	76
第六章 滚动轴承的振动监测技术	81
§ 1 滚动轴承失效的基本形式	81
§ 2 滚动轴承振动剖析和监测	86
§ 3 光纤监测技术	91
§ 4 接触电阻法	93
第七章 齿轮箱的振动监测技术	95
§ 1 齿轮和齿轮箱的失效形式和原因	95
§ 2 齿轮和齿轮箱的振动剖析	98

§ 3	齿轮箱故障诊断	101
§ 4	齿轮传动链的缺陷诊断	108
第八章	超声与声发射监测技术	112
§ 1	超声技术的原理	112
§ 2	超声技术的方法	115
§ 3	超声监测技术举例	117
§ 4	声发射技术	120
第九章	红外监测技术	122
§ 1	基本原理	122
§ 2	红外诊断应用之一——温度检测	126
§ 3	红外诊断应用之二——无损缺陷探查	128
第十章	润滑油样分析	132
§ 1	油样分析的步骤和原理	132
§ 2	铁谱分析仪器和残渣形态	134
第十一章	逻辑诊断与故障树分析	137
§ 1	逻辑代数的基本概念	137
§ 2	故障诊断中的基本逻辑问题	139
§ 3	故障树分析法基础	142
§ 4	故障树的定性分析	147
§ 5	故障树的定量分析	151
§ 6	故障树分析法的应用举例	155
第十二章	诊断信息量与合理诊断步骤的拟订	156
§ 1	熵的基本性质	156
§ 2	复合系统的熵	157
§ 3	信息的量度	160
§ 4	确定最佳诊断步骤的方法	164
附录 A	z 变换及其应用	171
§ 1	z 变换的定义和基本性质	171
§ 2	典型 z 变换对	173
§ 3	逆 z 变换	176
附录 B	协方差矩阵与多元正态分布	178
§ 1	协方差矩阵	178
§ 2	多元正态分布和最大似然方法	179
附录 C	机械运行状态监测与故障诊断信号处理软件目录	182
	主要参考文献	183

第一章 概 述

§1 机械故障诊断学的内容和方法

机械故障诊断学是一门近二十年内发展起来的新学科。它是随着机器的不断完善化、复杂化和自动化而发展起来的。所谓诊断,就是对机器的运行状态作出判断。机器在运行过程中内部零件受到力、热以及摩擦、磨损等多种作用,其运行状态不断变化,一旦发生故障,往往会导致严重的后果。因此必须在事故发生以前就查明并加以消除,即必须在机器运行过程中对机器的运行状态及时作出判断,采取相应的决策。例如,机器运行状态不正常,就必须停机检修,或停止使用;机器运行状态正常,则可以继续运行,等等;这样做,就大大提高机器运行的可靠性,进一步提高机器的利用率。

因此,机器故障诊断学是识别机器或机组运行状态的科学,它研究的是机器或机组运行状态的变化在诊断信息中的反映。它的内容包括对机器运行状态的识别,预测和监视三个方面。整个诊断过程如图 1-1 所示。

由于机器在装配后和在运行的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间隙和磨损量,无法直接检测关键零件裂纹的发生和扩展等等。因此机器故障诊断中所采用的检测、监视手段虽然多种多样,但诸如噪声和振动的测定、润滑油中磨损碎片的测定、温升的测定、声发射测定等等都有一个共同的特点:即它们都是间接地判断机器运行状态,都是属于间接测量之列。这样,用这些间接测量所得到的信息作为判断机器运行

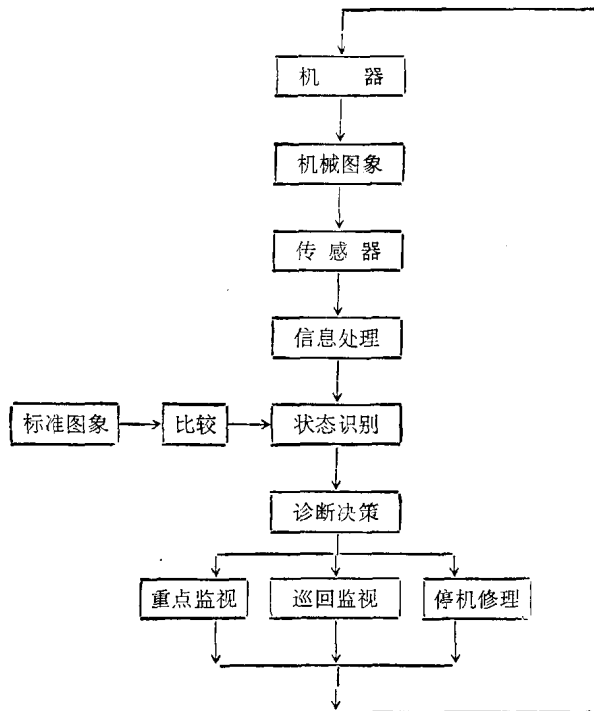


图 1-1 机械故障诊断过程

状态的特征时就带有某些“不确定性”。例如,判断机器在运行过程中主轴承的状态,究竟是正常状态还是异常状态,可选择轴承润滑油温作为判断轴承状态的特征。油温升高可能是由于轴承运行状态异常,也可能是由于室温升高,散热减慢,润滑油粘度偏高,或者运行时间较长等原因。因此,我们在判断时就可能出现两类决策错误:一种是把实际处于异常状态的机器误认为是正常状态;另一种是把实际处于正常状态的机器错认为是异常状态。如果我们同时用几个特征,例如,油温、润滑油分析和噪声,来监视机器主轴承的运行状态,则判断就较为可靠但也较为复杂。由此可见,正确的识别理论是十分重要的。

在识别理论中,首先要明确区分所要识别的状态,提出诊断的对象;其次,要选择检测的特征,确定这些特征和机器状态之间的关系;第三,要提出决策规则。通常,机器的状态是事先规定的,为了区分正常状态还是损坏状态,应相应地选择一组检测特征。如果将机器状态划分得更细一些,例如将损坏状态分为花键剧烈磨损、叶片剧烈振动等,则需要选择另一组检测的特征。因此,状态识别问题也可以称为分类问题。

§ 2 诊断信息的来源和获取

机器在运行过程中获取诊断信息的常用方法有直接观察法、振动噪声检测法、磨损残留物检测法、运转性能检测法等。

1. 直接观察

对机器进行直接观察可以对零件的状况获得第一手资料,操作人员根据积累的经验可以直接对机器状态作出判断。但这种方法_{是定性的,或者说是较粗略的,且常只适用于能直接观察到的机器零件。}为此,往往在直接观察中采用一些简单的仪器来扩大人眼的观察能力。这些仪器有用于照明机器内部暗处的光纤探头、光学内孔检查仪和铸件内表面检查仪、红外测温器、热敏涂料,以及探查表面微细裂纹用的着色渗透剂等。

除了上述一些辅助观察仪器外,将直接观察到的情况进行记录也是十分有效的手段,特别是需要分析零件在一段时间内的变化或趋势,以及难于当场作出判断的情况。

2. 噪声和振动的测量

机器在运行的过程中的噪声和振动是诊断的重要信息,它反映了机器的状态。噪声和振动的测量可以分为三个步骤:首先是总的噪声或振动强度测定,用以初步判断机器运行是否存在问题;其次是频谱分析,用来进一步判断机器中问题发生在什么环节上;第三是采用一些特殊技术,对特定的零部件,例如滚动轴承、齿轮传动链等进行深入分析。一般来说,在进行机器状态诊断时,总是先进行总的强度测定,发现问题时,再作频谱分析和其他测定。

在噪声和振动测量中,仪器可以是便携式的,也可以是固定安装的。后者用于防止重要机器发生安全事故和突然损坏及进行监控的场合。

3. 磨损残余物的测定

机器零件,例如轴承、齿轮、活塞环、缸套等在运行过程中的磨损残余物可以在润滑油中找到。现在测定的方法分为三种:一种是直接检查残余物,以及测定油膜间隙内电容或电感的变化、润滑油混浊度的变化等方法以迅速获得零件失效的信息。第二种是残余物的收集,例如采用磁性探头、特殊的过滤器等收集齿轮、滚动轴承等工作表面疲劳引起的大块剥落颗粒。第三种方法是油样分析,可以确定机器中什么零件在磨损。

4. 整机性能测定

指测量机器的输出或输出与输入的关系来判断机器运行状态是否正常,例如,测量机床加工精度变化、粉碎机粉碎物粒度的变化、泵的效率、柴油发电机组的耗油量与输出的关系;又例如测量两个输出变量之间的关系,例如,热交换器的温差与流量的关系,泵的流量与压力的关系等。这些指标对于机器的初期失效反应往往并不很灵敏,因为一些主要零件在影响机器性能以前可能已经存在缺陷,只不过没有反映到这些指标上去罢了。

5. 零件性能测定

主要用于对机器可靠性起决定性影响的关键零件。虽然零件的状况主要依靠直接观察、振动与噪声测量以及磨损残余物测定等一些方法,对特定零件的状态还需有一些特殊的方法来确定。例如,采用电阻应变片、声发射等非破坏性检验方法来监测机器零件的状况,采用非接触式电子探头测量轴心的位置,用热电偶测量轴承中摩擦发热的情况,安装专用的传感器测量汽缸衬套的磨损状况,采用直接观察、噪声和气味收集分析的方法检查密封状况。

机器零件在运行过程中发热是一种普遍的物理现象。温度测量和监视的技术一般比较成熟。反应速度快的测温方法有采用热电偶、红外热象、热敏涂料和易熔合金塞等。

§ 3 机械故障诊断的几种类型

由于机器运行的状态千差万别,其工作条件又各不相同,对机器进行故障诊断可以分为如下几种类型:

1. 功能诊断和运行诊断

功能诊断是针对新安装或刚维修后的机器或机组,需要检查它们的运行工况和功能是否正常,并且按检查的结果对机器或机组进行调整。而运行诊断是针对正常工作的机器或机组,需要监视其故障的发生和发展。

2. 定期诊断和连续监控

定期诊断是每隔一定时间,例如一月或数月对工作状态下的机器进行常规检查,例如主轴承的振动情况。而连续监控则是采用仪表和计算机信息处理系统对机器运行状态进行监视或控制。两种诊断方式的采用,取决于设备的关键程度、设备事故影响的严重程度、运行过程中性能下降的快慢以及设备故障发生和发展的可预测性,如表 1-1 所示。

表 1-1 两种诊断方法采用的条件

性能下降速度	故障不可预测	故障可预测
快	连续监控	定期更换
慢	定期诊断	定期诊断

3. 直接诊断和间接诊断

直接诊断是直接确定关键零部件的状态,如主轴轴承间隙、齿轮齿面磨损、燃气轮机叶片的裂纹以及在腐蚀环境下管道的壁厚等。直接诊断往往受到机器结构和工作条件的限制而无法实现,这时,就不得不采用间接诊断。

所谓间接诊断是通过二次诊断信息来间接判断机器中关键零部件的状态变化。多数二

次诊断信息属于综合信息,例如前述的用润滑油温升来反映主轴承的运行状态,因此,在间接诊断中出现伪警和漏检两种可能性都会增大。

4. 常规工况下诊断和特殊工况下诊断

多数诊断在机器正常工作条件下就能进行的,只有在个别情况下才需要创造特殊的工作条件来拾取信息。例如,动力机组的起动和停车过程,需要跨过转子扭转、弯曲的几个临界转速。利用起动和停车过程的振动信号作出的瀑布图,常包含着许多在常规诊断中所得不到的诊断信息。

§ 4 机械故障诊断技术的现状和发展

机器故障诊断技术最早是在六十年代初期,由于航天、军工的需要而发展起来的,以后逐步推广到核能设备、动力设备和其他一些大型成套设备中去,诸如流体动力机械(如发动机、汽轮机、压缩机和水轮机等)、加工机械(如金属切削机床和压力加工机床)、电气机械和运输机械,以及压力容器、管道系统等。

下面举例说明机器故障诊断技术在一些领域中应用的现状。

(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要监视 20~40 个参数,这些信息分为三类:一类是直接显示在驾驶舱中正确驾驶所必需的信息(如发动机的振动情况)。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。第三是地面检修时得到的信息(例如,直接观察、滤油器检验等)。多数参数在飞行中记录 1~2 次。全部信息送到诊断中心进行分析,根据分析的结果并与过去的记录比较,得出继续正常运行、进一步进行观察、更换零部件或将发动机停止使用的决策。

(2) 船用机器的故障诊断 舰船上各种机器和电机所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,齿轮和轴承等的缺陷。采用统计分析和计算机可以确定这些机器的状态,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视手段,所监视的机器包括船用泵、压缩机、柴油机、蒸汽轮机和燃气轮机等。

(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、固定式和移动式柴油机中。汽车、拖拉机发动机的使用属于大量的性质,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。大量生产的发动机,其修理所需的劳动量要比制造劳动量大 5~10 倍。进行预防性“按状态”修理可以收到很大的经济效益。它们的诊断是由装备有振动噪声测量设备的流动诊断站进行的。有的诊断仪器采用了逻辑识别方法,可以由 53 个特征参数鉴别出发动机的 33 种故障。

(4) 机床和生产机械故障诊断 随着机床和生产机械自动化程度的不断提高,性能的不断改善,机床和生产机械的结构日趋复杂,同时兼有电气控制系统、电气、气动和液压传动部件以及复杂的机械执行机构。近年来开始用信息论作为基础来制订合理的寻障程序以减少检修的劳动量,提高运行的可靠性。在机床调整和操作说明书中附入诊断卡片,以利于在生产中推广诊断程序和提高产品质量。

由于故障诊断技术是近二十年来发展起来的新兴学科,上述仅仅是在开始推广过程中的一些例子,除了机械工程外,电子工业也是一个重要的应用领域。可见故障诊断学这一学科具有很强的渗透能力。

从发展趋势看,近年在国内外研究的人不断增多,研究的手段和方法也日新月异,七十年代以来,发展尤其迅速,与古老的启蒙时期比较,在诊断方法上已经从用感官直接判断进入到充分利用近代测试、监控技术的阶段。各种先进的技术机械故障诊断中都找到了用武之地,例如,计算机模拟、动态信息处理、机械图象分析、润滑油样分析,等等,已经形成了各具特色的流派和分支。

从近期看,机械故障诊断的原理和方法将会在一些对机器故障十分敏感的领域,例如,飞机发动机、航天、化工机械、船舶发动机等方面首先得到应用,同时也将逐步推广到其他一些机械行业。根据当前开展的情况,下面一些研究方向将会得到迅速发展。

(1) 在数理统计理论的指导下发展完善的判别方法,在一些关键机械设备上推广故障树分析技术,制订合理的诊断程序。

(2) 从时域和频域两个方面发展机械图象分析技术和计算机信息处理,特别是机器振动和噪声的分析;提高信噪比,改善对故障诊断的灵敏度和可靠性。

(3) 机器故障的计算机模拟和模型分析方法。

(4) 典型机器部件(轴承、齿轮箱、液压系统等)的失效机理及其在二次信息中的反映。

(5) 发展复杂自动化机械系统的在线监控、预警技术和人工智能、专家系统。

(6) 发展和推广先进的诊断方法和手段。例如,直接在液压系统运行过程中在导管外壁采用测量流量的超声流量计,声发射技术,以及在滚动轴承运行中监视的光纤传感器等。

第二章 机械图象分析基础

§1 时域分析方法

所谓机械图象,是指机械系统在运行过程中各种随时间而变化的动态信息,如振动、噪声、温升、压力以及反映机器状态的各种参数,经过各种动态测试仪器拾取,并用记录仪器记录下来的图象。很明显,这类机械图象是机械故障诊断的原始依据。

机械图象按其性质来分,可以分为三类。第一类是随机信号的图象,随机信号的幅值、形状以及峰值出现的时刻都是随机的,理论上说,波形在无限长的时间内不会重复,是由大量的脉冲合成的,如图 2-1a 所示。第二类是周期信号的图象,周期信号的波形每经过一定时间重复一次。一旦我们确定了这种信号在一个周期中的状况,则这种信号在其他时刻的状况可以准确地确定。例如,发动机曲轴每转一转,其输出信号会准确地重复一次,如图 2-1b 所示。还有一类瞬时信号的图象,如图 2-1c 所示,瞬时信号在某个时刻出现而到某个时刻消失。

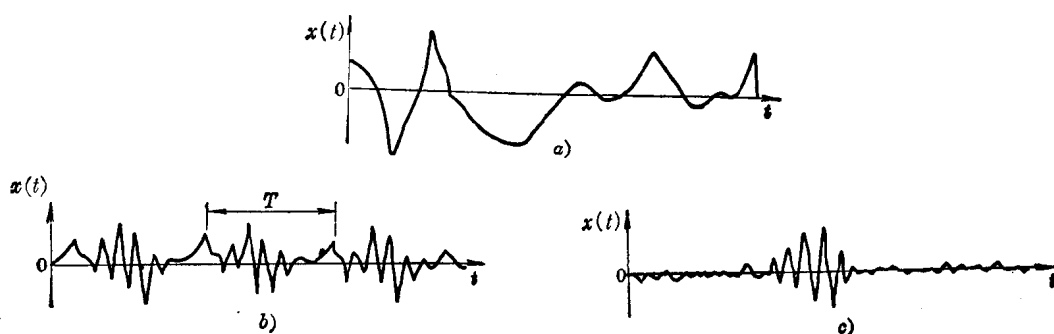


图 2-1 机械图象的几种类型

a) 随机信号图象; b) 周期信号图象; c) 瞬时信号图象

实测记录到的机械图象往往是上述三种的组合,因此一般机械图象可称为随机信号图象,这样信号分解就成了一种十分有用的技术,这在下面可以看到。

由测量仪器记录的机械图象一般是连续的信号,经过模数转换后才能把连续信号转换为离散信号。这种转换是应用电子计算机工具所必须的操作步骤。

对随机信号来说,可以分为平稳的、非平稳的和弱平稳的三种。正常工作的机械系统,其信号是平稳和弱平稳的;对于过渡状态和异常状态下的机械系统,其信号往往是非平稳的。三种类型的随机信号是这样区分的:如果在时间的某一时刻,信号的平均值、方差和高次矩(包括峭度、偏斜度指标等)都保持不变,则信号是平稳的;如果不考虑高次矩,只考虑平均值和方差,如果这两个参数保持不变,则称信号是弱平稳的。很明显,弱平稳的条件要比平稳的要求放宽多了。

如果将一个机械图象的时间坐标均匀划分为间距 t_1, t_2, \dots, t_n , 求出每一点上的幅值 $x(t_i)$ 并加以平均, 则就可以得到

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(t_i) \quad (2-1)$$

$$D_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x(t_i) - \bar{x}]^2 \quad (2-2)$$

式中 \bar{x} 为信号的平均值; D_x 为信号的方差。

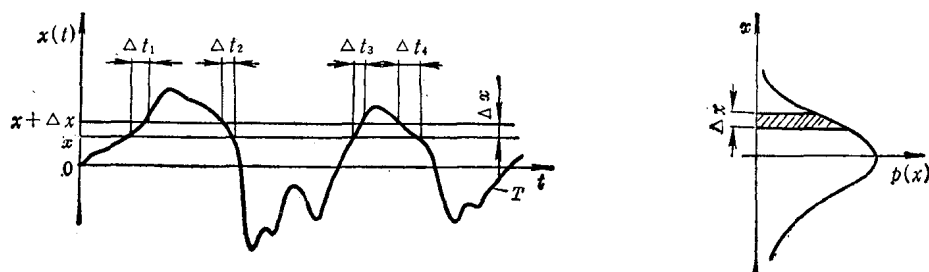


图 2-2 机械图象的分布函数

对于分布密度函数 $p(x)$, 如图 2-2 所示, 我们在记录曲线上作出一组与横坐标平行, 相距为 Δx 的直线, 则 $x(t)$ 值落于 x 到 $x + \Delta x$ 之间的概率可以用 T_x/T 的比值确定, 其中 T_x 是在总的观察时间 T 中幅值 $x(t)$ 位于 $(x, x + \Delta x]$ 区间内的时间。当 T 趋向无穷大时, 这一比值就越来越精确地描述事件的概率

$$P[x < x(t) \leq x + \Delta x] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_x}{T}$$

当 Δx 小时, 分布密度 $p(x)$ 可由下述关系确定:

$$p(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P[x < x(t) \leq x + \Delta x]}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x} \left[\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T_x}{T} \right]$$

信号 $x(t)$ 的平均值可以用分布密度 $p(x)$ 表示:

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x) dx \quad (2-3)$$

即平均值 \bar{x} 等于 $x(t)$ 全部取值的加权和。同样, 方差

$$D_x = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx \quad (2-4)$$

即方差 D_x 等于 $(x(t) - \bar{x})^2$ 全部取值的加权和。

分布密度可以直接用于机器状态的诊断。图 2-3a 与 b 是车床变速箱的噪声分布规律。新旧两只变速箱的分布规律有着明显的差异。由于平均值没有携带机器状态的信息, 在平稳随机过程中保持定值, 为方便起见, 可取 $\bar{x} = 0$; 而方差 D_x , 在噪声诊断中代表噪声的平均

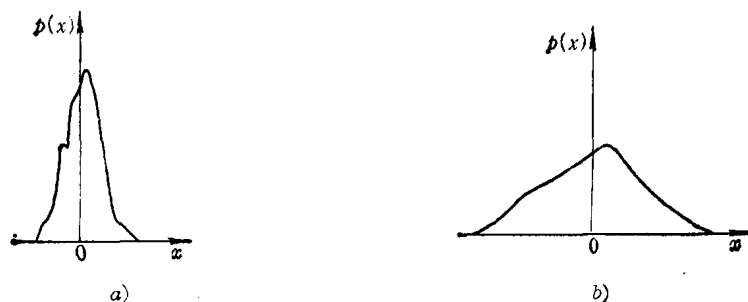


图 2-3 车床变速箱噪声分布密度

a) 新机床噪声分布密度; b) 旧机床噪声分布密度

功率, 具有重要的意义, 分布密度的三次矩和四次矩分别称为偏斜度指标和峭度指标, 用于和正态分布曲线进行比较, 定量地确定偏离正态分布的程度, 它们的数值可以如下确定。

对于偏斜度指标:

$$\alpha_3 = \int_{-\infty}^{\infty} x^3 p(x) dx \quad (2-5)$$

对于峭度指标:

$$\alpha_4 = \int_{-\infty}^{\infty} x^4 p(x) dx \quad (2-6)$$

在时域分析中, 除了分布密度函数及数字特征方差、偏斜度和峭度指标外, 自相关函数和互相关函数是机械图象的重要特征。

图 2-4 所示的是两种噪声的机械图象。二者的幅值大体相等, 但即使从外观上看, 它们之间也极少有相似之处。为了能够评定它们幅值变化剧烈的程度, 我们采用一个专门的约计量——自相关函数 $R(\tau)$ 。如果时间间隔 τ 很小时幅值之间的差异就很大, 则这一机械图象的变化就很剧烈, 自相关函数 $R(\tau)$ 值就小; 反之, 即使时间间隔 τ 很大时幅值一般仍很接近, 则机械图象的变化就很缓慢, $R(\tau)$ 值就比较大, 我们取

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t \pm \tau) dx \quad (2-7)$$

为了说明 $R(\tau)$ 的性质, 如图 2-5 所示, 可以将函数 $x(t)$ 平移过一段间距 τ , 这时可以得到一个新的函数 $x(t+\tau)$ 或 $x(t-\tau)$ 。新的函数 $x(t \pm \tau)$ 的值与原有函数 $x(t)$ 在时间 t 时的取值相等。现在让我们考虑在时间 t_i 时函数 $x(t_i)$ 与 $x(t_i - \tau)$ 的乘积 $x(t_i) \cdot x(t_i - \tau)$, 当机械图象变化剧烈时, 这一乘积有正有负, 求和后得到的 $R(\tau)$ 值必然很小; 反之, 当机械图象变化平缓时, 这一乘积符号基本一致, 求和或积分后得到的 $R(\tau)$ 值就会增大。

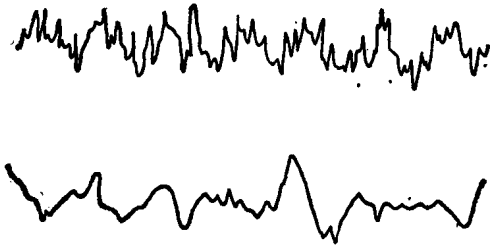


图 2-4 两种不同噪声图象

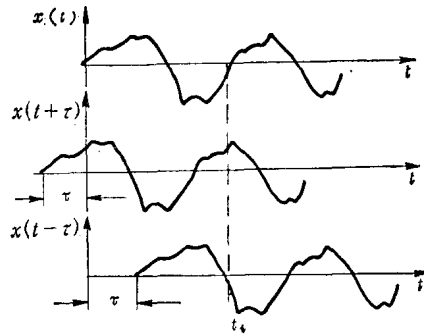


图 2-5 自相关函数确定

自相关函数在 $\bar{x}=0$ 时具有下面一些重要的特征:

(1) 自相关函数是偶函数, 改变参变量 τ 的符号时, 函数的值不变, 即 $R(-\tau) = R(\tau)$ 。这样, 作图时, 只需要作出正 τ 值的一半曲线即可。

(2) 当 $\tau=0$ 时, 自相关函数 $R(0)$ 等于信号的方差 D_x :

$$R(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t) dx = D_x$$

(3) 当 $\tau \neq 0$ 时, 自相关函数 $R(\tau)$ 的值总是小于 $R(0)$, 即小于方差 D_x 。这是因为

$$[x(t) - x(t-\tau)]^2 = x^2(t) - 2x(t) \cdot x(t-\tau) + x^2(t-\tau) \geq 0$$

因此有

$$\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \geq \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot x(t-\tau) dt$$

或

$$R(0) \geq R(\tau)$$

如果将自相关函数 $R(\tau)$ 除以方差 D_x , 则所得到的称为自相关系数。自相关系数的值应在 +1 与 -1 之间变化。

可以证明, 简谐振动信号的自相关函数是余弦曲线

$$R(\tau) = \frac{A^2}{2} \cos \omega_0 \tau$$

它是没有衰减的周期曲线, 其周期与原来简谐振动的周期相同, 但失去了有关相位的信息。对于图 2-4a 与 b 所示的随机信号, 其自相关函数 $R(\tau)$ 将随 τ 的增大而迅速衰减到零, 但衰减的速度不同。对于图 2-4a 所示的窄频带信号, 衰减得慢(图 2-6a); 而如图 2-4b 所示的宽频带信号, 衰减得快(图 2-6b)。这样, 简谐振动或其他定值信号(非随机信号) 的自相关函数, 不论参变量 τ 如何变化, 都不会衰减, 而随机信号的自相关函数当参变量 τ 增大时将趋向于零。因此, 自相关函数是在机器噪声中找出周期信号或瞬时信号的重要手段。这只要延长参变量 τ 的取值, 将信号中的周期分量暴露出来即可。

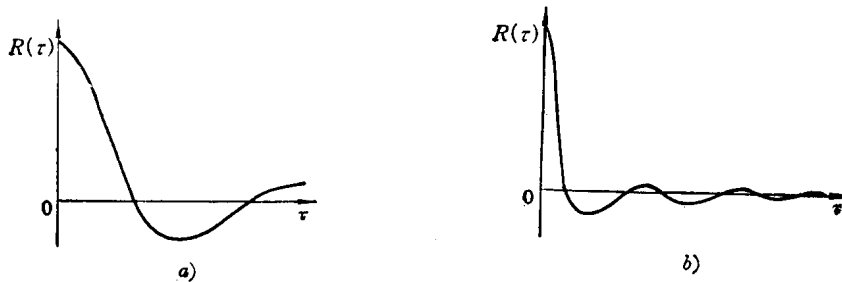


图 2-6 窄带和宽带信号的自相关函数

a) 窄带信号的自相关函数; b) 宽带信号的自相关函数

例如, 当我们用噪声来诊断机器状态时, 正常运行下的机器噪声是大量的、无秩序的、大小接近相等的随机冲击的结果, 因此具有较宽而均匀的频谱。当机器运行状态不正常时, 在随机噪声中将出现有规则的、周期性的脉冲, 其大小要比随机冲击大得多。例如, 当机构中轴承磨损而间隙增大时, 轴与轴承盖就会有撞击的现象。同样, 如果滚动轴承的滚道出现剥蚀、齿轮传动中某个齿面严重磨损或花键配合的间隙增加等情况出现时, 在随机噪声中都会出现周期信号。因此, 用噪声诊断机器故障时首先就要在噪声中查出隐藏的周期分量; 特别是在故障发生的初期, 周期信号不明显, 直观难以发现的时候, 可以采用自相关分析方法, 依靠 $R(\tau)$ 的幅值和波动的频率查出机器缺陷之所在。

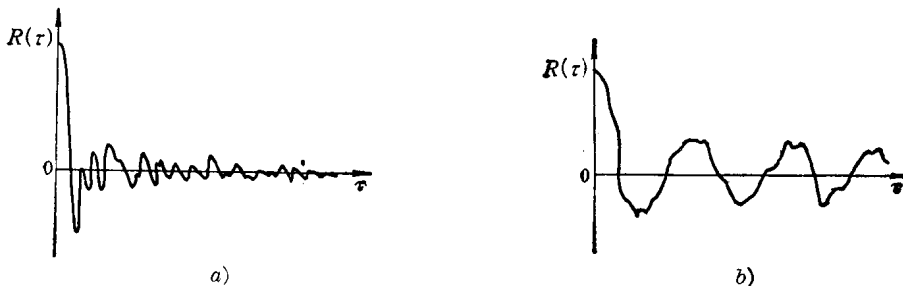


图 2-7 C 630 型车床主轴箱噪声的自相关函数

a) 正常状态变速箱噪声自相关函数; b) 异常状态变速箱噪声自相关函数

图 2-7 所示是两台 C630 型车床变速箱噪声的自相关函数。图中 *a* 是正常状态, *b* 是异常状态 (标明在变速箱中存在某种缺陷)。将变速箱各根轴的转速和 $R(\tau)$ 的波动频率进行比较, 可以确定这一缺陷的位置。检查变速箱的状况, 完全证实了噪声分析所作出的诊断。

图 2-8 所示是拖拉机变速箱噪声的自相关曲线。其中 *a* 图是正常状态下的变速箱噪声, 当 $\tau=0$ 时, $R(\tau)$ 有一峰值; 随着 τ 的增大, 其自相关函数迅速趋近横坐标, 这说明变速箱的噪声是随机噪声。相反, 在 *b* 图中, 变速箱的随机噪声中夹杂有周期振动, 当 τ 值增大时, 自相关曲线并不向横坐标衰减, 这种情况标志着运行状态不正常。

对于两个机械图象, 可采用互相关函数来表征它们幅值之间的相互依赖关系。如图 2-9*a* 所示, 设有两个机械图象 $x(t)$ 和 $y(t)$, 需要考察信号 $x(t)$ 在时刻 t 与信号 $y(t)$ 在时刻 $t+\tau$ 之间的幅值有什么联系。和自相关函数类似, 我们以 $\sum x(t_i) \cdot y(t_i+\tau)$ 来表征, 或者较精确地, 用互相关函数

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t+\tau) dt \quad (2-8)$$

来表征。

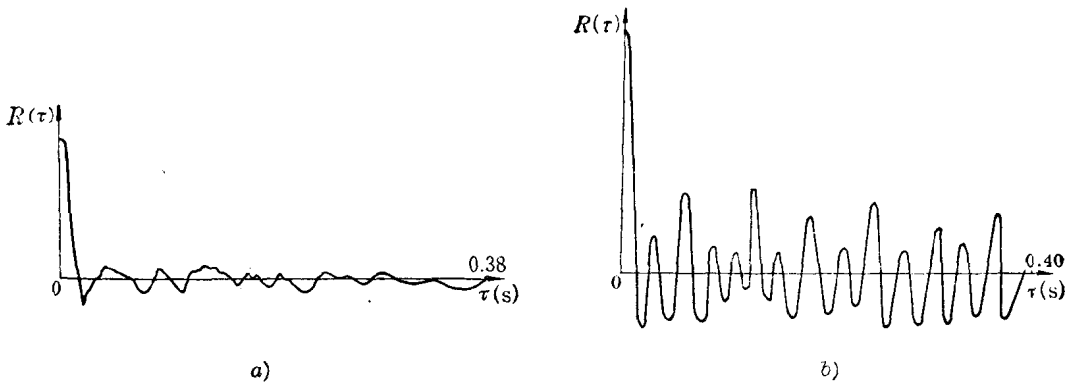


图 2-8 拖拉机变速箱噪声的自相关函数

a) 正常状态噪声自相关函数; b) 异常状态噪声自相关函数

互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 是实函数, 即可以为正, 也可以为负。但它与自相关函数不同, 不一定是偶函数, 且在 $\tau=0$ 时, $R_{xy}(\tau)$ 的值不一定是最大值。

互相关函数具有反对称性质。如果 x, y 互易位置, 则有

$$R_{xy}(-\tau) = R_{yx}(\tau)$$

图 2-9*b* 所示是两个机械图象的互相关函数。图中的尖峰表示 $x(t)$ 与 $y(t)$ 之间在 $\tau=\tau_1$ 时存在相关联系, 而在其他时间间隔则没有这种联系。

互相关函数可以用来测量一种随机干扰的平均传输速度: 考虑沿某一方向传播的某种干扰, 当我们在此方向上相距 L 的两点测量此干扰时, 可以得到两个信号 $a(t)$ 与 $y(t)$ 。用 $x(t)$ 与 $y(t)$ 之间的互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 即可识别出干扰传播的方向和平均传播的时间。

如果把 $x(t)$ 看作是系统的输入, $y(t)$ 看作是系统的输出, 那末互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 不但反映了信号经过系统的时间, 也反映了经过系统后信号的变化。

如果信号通过各个通道的时间为已知, 等于 τ_1, τ_2 和 τ_3 , 则利用互相关函数可以确定各个传递通道影响的大小。这只要观察对应于 τ_1, τ_2 和 τ_3 处 $R_{xy}(\tau)$ 的峰值的大小即可。