



项目引领、任务驱动

示范性高等职业院校课改规划教材



机械设备故障诊断技术

主编 袁 健

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

机械设备故障诊断技术

主编 袁 健

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书内容主要包括绪论、信号处理基础、机械设备的主要故障形式及其分析方法、振动诊断技术、往复机械的故障监测与诊断、齿轮传动的故障监测与诊断、滚动轴承的故障监测与诊断、滑动轴承的故障监测与诊断、电动机的故障监测与诊断。本书从实用性角度介绍了机械设备故障诊断技术的基础知识及常用技术方法。

本书可作为高职院校专科教材,也可供从事机械故障诊断工作的工程技术人员参考。

175987

图书在版编目(CIP)数据

机械设备故障诊断技术/袁健主编.——哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2011.1

ISBN 978-7-5661-0007-8

I. ①机… II. ①袁… III. ①机械设备-故障诊断-高等学校:技术学校-教材 IV. ①TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 013691 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 9
字 数 212 千字
版 次 2011 年 1 月第 1 版
印 次 2011 年 1 月第 1 次印刷
定 价 18.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

机械故障诊断技术是一种了解和掌握机器在运行过程中的状态,确定其整体或局部正常或异常,早期发现故障及其原因,并能预报故障发展趋势的技术。该技术发展至今,丰富了设备管理和维修的专业领域,已成为设备管理与维修的有力支撑。随着当前我国高职院校的不断发展及人才市场对专业应用型人才的新需求,有必要为广大大中专院校师生提供一些较为实用的机械故障诊断类技术书籍。本书旨在对故障诊断技术的基础知识、机理、方法、理论基础和应用技术作一简单的解释说明,故编写过程中有意突出实用性,淡化抽象的理论知识。

全书共分九章。其中蔡东林老师编写第5章、第6章、第7章,江元河老师编写第8章、第9章,其余由袁健老师编写,全书由袁健老师统稿。编写过程中得到了徐亮、薛海龙两位老师的大力协助。本书在编写过程中参考了大量近期出版的相关文献,在此表示衷心的感谢!

由于编者水平有限及时间仓促,错误之处在所难免,希望广大读者批评指正。

编 者
2010年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 机械设备故障诊断技术的基本原理、基本内容和基本方法	1
1.2 开展机械设备故障诊断的意义	3
1.3 机械设备故障诊断技术的发展概况	4
第 2 章 信号处理基础	7
2.1 信号处理的基础知识	7
2.2 常用传感器及其原理	8
2.3 信号调理	17
第 3 章 机械设备的主要故障形式及其分析方法	20
3.1 机械设备的主要故障形式	20
3.2 利用故障树分析法分析故障	22
3.3 机械设备的故障诊断参数	26
3.4 机械设备故障状态的确定及其方法	30
第 4 章 振动诊断技术	36
4.1 概述	36
4.2 单自由度系统的振动	40
4.3 多自由度系统的振动	49
4.4 随机振动	51
4.5 振动监测参数及标准	52
第 5 章 往复机械的故障监测与诊断	67
5.1 概述	67
5.2 往复机械的振动诊断法	68
5.3 往复机械故障诊断的油样分析法	75
第 6 章 齿轮传动的故障监测与诊断	85
6.1 齿轮故障的常见形式和原因	85
6.2 齿轮的振动机理	88
6.3 齿轮的振动测量和简易诊断	93
6.4 齿轮故障诊断常用信号分析处理方法	96
6.5 齿轮常见信号故障特征与精密诊断	99
第 7 章 滚动轴承的故障监测与诊断	106
7.1 概述	106
7.2 滚动轴承的主要故障形式	106

7.3	滚动轴承的振动诊断机理	107
7.4	滚动轴承各构件的振动特征	107
7.5	滚动轴承的振动测点选择	110
7.6	滚动轴承的振动诊断法	110
7.7	滚动轴承诊断标准的确定	115
第8章	滑动轴承的故障监测与诊断	116
8.1	滑动轴承的主要故障形式	116
8.2	滑动轴承的故障诊断技术	119
第9章	电动机的故障监测与诊断	127
9.1	电动机的主要故障形式	127
9.2	电动机振动的测量与诊断	129
	参考文献	135

第1章 绪论

1.1 机械设备故障诊断技术的基本原理、基本内容和基本方法

1.1.1 机械设备故障诊断技术的基本内容

机械设备故障诊断技术(Mechanical Fault Diagnosis)是利用测取机械设备在运行中或相对静态条件下的状态信息,通过对所测得信号进行分析和处理,并结合诊断对象的历史状态,来定量识别机械设备及其零部件的实时技术状态,并预知有关异常故障和预测未来的技术状态,从而确定必要对策的技术。

机械设备故障诊断技术根据诊断的目的及所选取的诊断方法的不同,其实施过程也有所不同,但其基本过程是相同的,主要包括机械设备状态信号特征的获取、故障特征的提取、故障诊断、维修决策的形成,其实施过程如图1-1所示。

设备诊断技术就是分析设备的现在状态与异常或故障之间的关系,以预测未来的技术。它包含两方面的内容:一是对设备的运行状态进行监测;二是在发现异常情况后对设备的故障进行分析、诊断。具体可细分为以下四个步骤。

1. 机械设备状态信号的获取

机械设备状态信号是机械设备异常或故障信息的载体最能反映诊断对象状态特征的信号。选用一定的方法和检测系统采集是故障诊断技术实施过程中不可缺少的环节。能够真实充分地采集到足够数量、客观反映诊断对象状况的状态信号是故障诊断技术成功与否的关键,否则,其他部分再完善也将是无效的。状态信号的获取可通过振动、温度、压力、转速、光谱、铁谱、声发射、激光测试等测取相应的参数。

2. 机械设备故障特征的提取

所采集到的表征诊断对象运行中的原始状态信号被称为初始模式。在初始模式中,故障信息混杂在大量的背景噪声中,为提高诊断的灵敏度和可靠性,必须采用信号处理技术,在状态信号中排除噪声、干扰的影响,提取有用的故障信息,以突出故障特征。因此,故障特征提取就是将初始模式进行维数压缩、形式变换、排除干扰、保留或增强有用信号、精化故障特征信息的过程,并由此形成待检模式。信号可分为模拟信号或数字信号,由于数字信号精确,传输过程中不易失真,具有更适合于计算机处理的优点,今后信号处理发展的主流将是数字信号处理。信号分析主要有时域分析法和频域分析法两种方法。时域分析法是将信号分解为在时间上的具有不同延时的简单时间信号分量的叠加,如信号的响应分析、数字滤

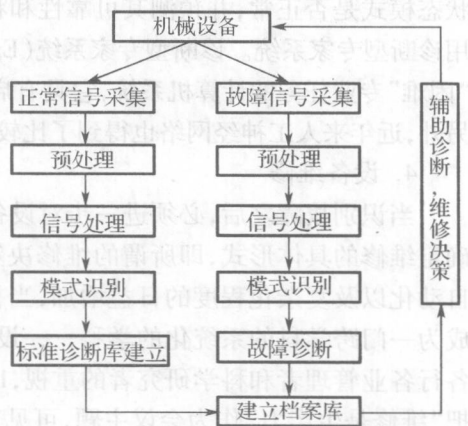


图1-1 机械设备故障诊断的实施过程

波、卷积计算及其相关分析等。信号的频域分析法是将信号经过某种变换(如傅氏变换、拉氏变换、小波变换等)后得到有关信号的某些特征量的值,该方法也被称为谱分析法。谱分析法主要有经典谱分析法和现代谱分析法。近来有学者提出的幅值域分析的概念,以信号的幅值特征参数为基本量(如最大值、最小值、期望值、方差、概率密度函数、概率分布函数以及脉动指标、峭度指标、峰值指标等)用来分析信号的振动程度。经典谱分析法以 FFT 为代表,被广泛用于信号分析、故障诊断、图像处理等许多方面。国内外都有大量的 FFT 软、硬件产品问世,并且在不断地发展。现代谱分析法采用建模的方法来估计信号的谱参数,因其速度快,运算量小,精度高,所以受到越来越多的重视。目前被广泛应用的谱分析法有自回归法(AR)、滑动平均法(MA)和自回归滑动平均法(AR-MA)。

3. 故障诊断

故障诊断是一个典型的模式识别过程,诊断文档中的各种故障样板模式就是进行技术状态识别的基础。所谓技术状态识别,是指将待检模式与诊断文档库中的样板模式进行对比,并将待检模式归属到某一已知的样板模式中去的过程。由此便可判定诊断对象所处的状态模式是否正常,并预测其可靠性和状态的发展趋势。目前,机械设备故障诊断中主要采用诊断型专家系统。诊断型专家系统(Expert System)是一种能以人类专家水平完成“专门”和“困难”专业任务的计算机系统,它具有启发性、透明性、灵活性等特点,是一种高级推理系统。另外,近年来人工神经网络也得到了比较大的发展,已逐步被应用到机械故障的诊断之中。

4. 设备维修

当识别故障之后,必须进一步对设备的异常或故障及其危险程度作出评价,以便研究和确定维修的具体形式,即所谓的维修决策。随着现代科学技术的发展,机械设备的精密化、自动化以及复杂化程度的日益增加,当初仅仅采用简单技术和手工艺的维修技术渐渐发展成为一门跨学科的系统化的学科——设备维修工程。随着经济的发展,维修工程日益受到各行各业管理者和科学工作者的重视,1997年在中国广州召开的设备维修与管理国际会议把“维修是生产力”作为会议主题,可见其重要性。维修技术被作为当前可持续发展战略的关键技术。机械维修方式是指对维修时机的控制,它主要分为事后维修、计划维修和视情维修三种方式。

1.1.2 机械设备故障诊断技术的诊断理论和方法

1. 基于故障机理的诊断方法

基于故障机理的诊断方法是其他各种诊断方法的基础,从动力学的角度出发去研究故障的发生、发展机理及其出现故障之后对应的状态。

2. 基于故障树分析诊断法(FTA)

基于故障树分析诊断法是一种比较早的故障诊断方法,用逻辑推理图的方式分析机械设备各部位故障的发生及其故障产生的原因之间的相互关系,其目的是判断基本故障、确定故障发生的原因、影响以及故障发生的概率。它的诊断精确度不高,但是它表达直观,便于现场工人分析、处理。

3. 基于信号分析和处理的诊断方法

基于信号分析和处理的诊断方法主要是通过机械设备上安置传感器,采集机械设备的状态信息,然后进行分析处理,提取关于设备的运行情况以及有无故障、故障发生、发展情况。其关键技术是信号的分析处理方法。目前信号的分析处理主要有时域、频域、倒频谱、

时频分析等方法。

此外机械设备故障诊断技术的诊断方法还有基于模式识别的诊断理论,基于模糊数学的诊断理论,基于灰色系统的诊断理论,基于神经网络的诊断理论和方法,基于专家系统的智能诊断法,油液分析诊断法,红外热成像诊断法,无损探伤诊断法,热工参量诊断法,电工参量诊断法等。

1.2 开展机械设备故障诊断的意义

设备诊断技术是在设备管理和维修的基础上发展起来的。其首先出现在欧洲,主要是以英国倡导的设备综合诊断学为指导。在20世纪60—70年代,以Collacott为首的英国机械保健和状态监测协会最先开始开发故障诊断技术,他们在摩擦、磨损、汽车和发电机监测等方面处于领先地位。美国则是从设备维修发展而来,在1961年开始执行阿波罗计划后,出现了一系列因设备故障造成的事故。1967年在美国宇航局的倡导下,由美国海军研究室主持成立了美国机械故障预防小组,该小组积极从事技术诊断的开发,他们的研究成果在航空航天、军事及核能等尖端领域处于领先地位。日本则吸收了英美两国的优点,提出了全员维修(TPM)的观点。日本的新日铁自1971年开始开发诊断技术,1976年达到实用化。日本的钢铁、化工、铁路诊断技术世界领先。我国自1979年才初步接触开发机械设备诊断技术,目前我国机械设备故障诊断技术已在化工、冶金、电力等行业应用得较好。故障诊断技术经过30多年的研究与发展,已应用于飞机自动驾驶、人造卫星、航天飞机、核反应堆、汽轮发电机组、大型电网系统、石油化工工程、汽车、冶金、矿山设备等领域。

机械设备故障诊断技术是建立在多种基本技术基础之上的,并融合多种学科理论的新兴综合性学科。因此,该学科具有基础理论较新、体系边界模糊、实施技术繁多、工程应用广泛、发展日趋迅速以及与高新技术发展密切相关等特点。在对国内外故障诊断技术理论基础、技术方法及诊断装置等大量研究开发的基础上,随着电子计算机技术、现代测试技术、信号处理技术以及信号识别技术等不断向故障诊断技术领域渗透,故障诊断技术逐渐跨入了实用系统化的时代。20世纪80年代开始,利用计算机对机械设备故障进行有效的辅助监测和辅助诊断已成为重要的诊断手段,国内外对计算机诊断系统都积极地进行研制并将其应用于实际机组。例如,美国西屋公司,美国中心发电部,德国凯文公司等都开发有成套的诊断系统。国内清华大学热能工程系于1995年研制了大型电站的分布式智能监测与诊断系统。其他厂家,如北京测振仪器厂、振通公司、京航公司等也都开发、生产了机械设备故障诊断系统。此外还有许多汽车发动机故障诊断仪,如石油大学(北京)故障诊断中心开发的EDES-3型柴油机诊断系统,该系统已在油田领域得到了较为广泛的应用。

机械设备故障诊断技术的研究主要有两方面的意义:理论意义和经济意义。

1. 机械设备故障诊断技术研究的理论意义

(1) 检验相关理论的发展完善程度,寻找最佳故障诊断方法,完善机械设备故障诊断学。

(2) 通过实施机械设备故障诊断,带动与故障诊断有关的一系列相关理论,如信号采集、信号分析、模式识别等相关学科的发展。

(3) 为下一代机械设备的优化设计、正确制造提供反馈信息及理论依据,以保证设计出更完善更符合要求的下一代产品。

2. 机械设备故障诊断技术研究的经济意义

- (1) 及时而正确地对各类运行中的机械设备的异常或故障作出诊断,以便确定最佳维修决策,提高运营经济效益。
- (2) 保证各类机械设备无故障、安全可靠地运行,以便发挥其最大的设计能力和使用有效性。

1.3 机械设备故障诊断技术的发展概况

机械设备故障诊断技术的发展大致可分为四个阶段。第一阶段是在19世纪,当时机械设备本身的技术水平和复杂程度都很低,因此采用事后维修的方式。第二阶段是20世纪初到20世纪50年代,随着大生产的发展,机械设备本身的复杂程度也有了提高,机械设备故障或事故对生产的影响显著增加,在这种情况下,出现了定期维修的方式。这个时期,机械设备故障诊断技术处于孕育时期。第三阶段是20世纪60—70年代,随着现代计算机技术、数据处理技术等的发展,机械设备故障诊断技术在欧美一些国家得到了发展,出现了更科学的按设备状态进行维修的方式。第四阶段是进入20世纪80年代以后,人工智能技术和专家系统、神经网络等开始发展并在实际工程中得到应用,使机械设备诊断技术达到了智能化的程度。虽然,这一阶段发展历史并不长,但已有的研究成果表明,机械设备的智能诊断技术具有十分广阔的应用前景。

机械设备故障诊断的实施包括两个部分:第一部分是简易诊断技术,主要是由现场作业人员实施初级技术职能,对设备的运行状态迅速而有效地作出概括评价,其主要手段是经验评价法;第二部分是精密诊断技术,主要是由专业技术人员实施的高级精密技术,对简易诊断技术所测得的信息进行深入细致地分析和处理,从而确定故障性质、类别、部位、原因、程度乃至发展趋势等各种情况的技术,此项技术即为机械设备故障诊断技术的关键之所在。

近30年来,机械设备故障诊断技术不断吸取现代科学技术发展的新成果,从理论到实际应用都得到了迅速的发展。至今机械设备故障诊断技术已成为集数学、物理、力学、化学、电子技术、计算机技术、信息处理、人工智能等各种现代科学技术为一体的新兴交叉学科。其故障机理的研究、故障信息处理技术的研究、人工智能专家系统和神经网络、故障诊断装置的开发研究等都在飞速发展,具有十分广阔的前景。当代故障诊断技术的发展趋势主要有如下几个方向。

(1) 诊断装置系统化

为实现诊断自动化,把分散的故障诊断装置系统化,并使之与电子计算机相结合,实现状态信号采集、特征提取、状态识别自动化,能以显示、打印、绘图等各种方式输出机械设备故障“病历”——诊断报告。

(2) 诊断装置的集成化

随着电子集成化程度的提高,电子元器件的尺寸越来越小,便携式计算机的发展给诊断装置的集成化和小型化提供了保证。例如,美国恩泰克-爱迪公司的便携式油液分析仪,具有油污染度测定、铁磁粒计数、黏度测量等多种功能。

(3) 服务于现场的诊断系统

检测装置的集成化使得现场测试仪器的功能越来越强,许多原来必须在实验室进行的分析现在都可以在现场完成。现场诊断系统具有实时、直观,测量次数不受限制,不需原始

数据存储、转换过程的优点。

(4) 智能化专家系统

故障诊断专家系统是一种拥有人工智能的计算机系统,它不但具有系统诊断技术的全部功能,而且还将许多专家的经验、智慧和思想方法同计算机的巨大存储、运算和分析能力相结合,组成共享的知识库。这是故障诊断技术的高级形式,其研制与应用是必然的趋势。

(5) 标准化的定时诊断

第一代的故障诊断装置以携带式个别部位随机诊断为主,而今后凡重要的故障诊断均向标准化的定时诊断发展。

(6) 机械应具有适检性

第二代故障诊断装置要求被检测的机械设备具有适检性,例如,设计诊断插座、窥视孔或在有关部位布置好传感器,以确保实施状态监测和故障诊断的方便和迅速。

(7) “机械设备故障诊所”的建立

随着维修制度的改革,合理的预知维修将逐步取代定时维修,因而有可能建立“机械设备诊所”。目前国外已开展此类业务。例如,对数控机床实行遥控技术,可在“诊所”内利用专线进行遥测,并将被测信号进行处理,分析后与“诊所”的标准库进行比较,从而给出诊断结果。

(8) 建立机械设备故障数据库

随着计算机网络的发展,大型机械设备数据库的建立成为可能。这个数据库将包括设备的使用维修档案,为设备故障诊断提供必要的资料,如德国凯文公司 DATATEST 分析仪诊断程序中,建立了分析诊断程序库,存放了 23 个厂家 1 800 多种发动机的型号资料。这仅仅是一家的数据库,随着诊断技术的广泛应用,数据库的大型化和公用化将成为今后的发展趋势。

综上所述,机械设备故障诊断技术的发展趋势是“四化”:不解体化、高精度化、智能化、网络化。

对于不解体检测的研究,其方向是开发可预埋于发动机内的传感器。美国、日本等国家已成功地将超薄型传感器安置在发动机内,对发动机的温度及主要部件的配合间隙进行诊断,并利用光纤传感器监测发动机的转速波动。在信号技术处理方面,高精度化是指提高信号分析的信噪比。对于柴油机这样复杂运动的系统而言,其信号多是瞬态的、非平稳的、突变的,将小波理论用于这些信号的分析处理上,则可大大提高其分辨率。分形几何是将传统的几何方法中整数维数扩展成连续正数,使自然界中的几何对象——分形具有不必是整数的分形维数(Fractal dimension)。分形几何在非平稳的、瞬态的、突变的信号处理中也具有很好的应用前景。在振动信号的处理上,全息谱分析方法则充分考虑了幅、频、相三者的结合,弥补了普通傅氏谱只考虑幅、频关系的不足,能够比较全面地获取振动信号。智能化是指开发诊断型专家系统,使数据处理、分析、故障识别自动完成,以减轻诊断的工作量,并提高诊断速度及其正确性。在故障诊断的专家系统建立的基础上,要深入故障形成机理的研究,丰富系统的知识库,解决专家系统所谓的“瓶颈问题”,同时将模糊神经网络方法应用于故障诊断的专家系统中,使之具有一定的智能,具有自组织、自学习、联想功能,从而使诊断系统自我完善、自我发展。另外,诊断系统将由集中式走向分布式,系统的硬件生产标准化,软件设计规范化、模块化,这有利于缩短系统的开发周期,提高系统的可靠性。目前国外已开发出的智能型专家系统(如 TEST 系统、EDMS 系统和其他一些系统)以及国内开发出的智能型专

家系统,都在一定程度上显示出了智能型专家系统的生命力。

专家系统的核心主要包括知识库、知识获取部分、推理机、解释部分。目前大多数专家系统都是在以上几个部分的基础上对之加以细化的,并采用适当的知识组织、调度策略进行建构的。有学者将人工智能所面临的问题按时间进程进行了划分。1946—1984年主要面临了可用常规技术进行解决、具有良好结构的问题;1985—1992年主要面临了不具有良好结构,不能进行穷举搜索,只能采用启发式信息的问题;1992—1998年面临的是机器学习的障碍;1998年以后面临的是在硬件上开发并行处理计算机,在软件上开发出具有强大处理非单调问题的自学习系统的问题。诊断型专家系统作为人工智能领域的一个重要方面,其发展方向必然也是研制出现有的具有广泛意义的自组织、自学习系统。人工神经网络是在20世纪40年代被提出的,近年来得到非常迅速的发展。神经网络具有大规模并行、分布式存储和处理、自组织、自适应和自学习能力,特别适合于处理需要同时考虑许多因素和条件的、不精确和模糊的信息问题。神经网络在国民经济和国防现代化建设中具有广阔的应用前景。研究神经网络的意义在于以神经网络研究为开端,整个学术界对计算的概念和作用有了更新的认识和提高。计算不仅仅局限于数学中,更不仅采取逻辑的、离散的形式,在大量的物理现象以至生物学对象中,进行各种各样的计算,而且大量的运算表现在对模糊的低精度的模拟量的并行运算。对于后一类运算,传统的计算机无法施展其威力,神经网络的数学理论本质是非线性的数学理论,因此,现代非线性科学方面的进展必将推动神经网络的研究,同时,神经网络理论也会对非线性科学提出新课题。神经网络研究的对象是神经系统,这是高度进化的复杂系统,也是系统科学中一个重要的具体领域。神经网络研究不仅重视系统的动态特性,而且强调事件和信息内部的表达和产生。一般来说,任何能用传统的模型分析或统计方法解决的问题,用神经网络都能处理得更好。人们已提出了三十多种神经网络模型,在这些模型中,常用的模型约有十几种。近年来人们对神经网络的研究主要有:①新人工神经网络的模式开发;②人工神经网络性能改进;③人工神经网络特性分析与理论研究;④人工神经网络的应用研究。

网络化是21世纪机械设备故障诊断技术的发展方向,随着计算机网络技术的发展及通信技术的进步,利用各种通信手段将多个故障诊断系统联系起来,实现资源共享,可提高诊断的质量和精度。将故障诊断系统与数据采集系统结合起来组成网络则有利于对机组的管理,减少设备的投资,提高设备的利用率,必要时可与企业的MIS系统相联结,促进企业管理的一体化、现代化。

尽管机械设备故障诊断已取得了长足的发展,但它仍是一门正在发展的新兴学科,还远没有达到完善的水平,主要表现在以下几个方面:

(1) 发展不平衡,虽然旋转机械的故障诊断理论和实践都取得了较成熟的效果,但往复机械的诊断理论和实践还有待于进一步提高。

(2) 测量分析仪器和诊断仪器相脱离。便携式的多为分析仪器,一般为传感器、放大仪、数据采集系统+频谱仪,无法获取具体设备的特征数据。而较好的多为专用的、固定式的系统,一般固定在厂里或设备上,并专为该设备服务,其主要为诊断仪器。

(3) 现场用的机械设备的诊断专用系统还比较落后。简易诊断仪表的检测多数比较简单,且精度较低;精密信号分析仪价格贵,一般只对振动信号进行分析,由于其专业程度较高,现场的使用人员很难正确使用。

第2章 信号处理基础

2.1 信号处理的基础知识

信号或动态数据的处理与分析,是设备故障诊断的前提和基础。本章所说的信号是指测量信号,它是对系统的某物理量,如位移、速度、加速度、应力、应变等进行观测获得的数据。

测量信号可按照信号的特性进行分类,见图2-1所示。

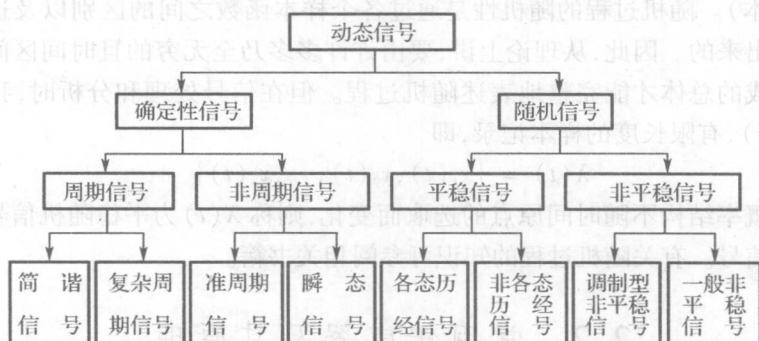


图2-1 信号的分类

如果描述系统的状态变量可以用确定的时间函数来表述,则称这样的物理过程是确定性的,而描述它们的测量数据就是确定性信号,见图2-2所示。

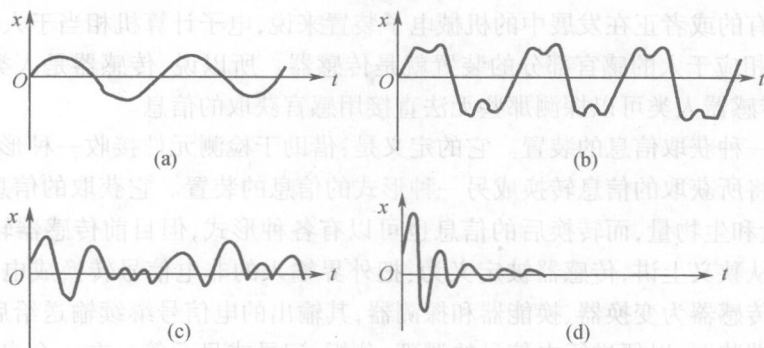


图2-2 确定性信号

(a)简谐信号;(b)复杂周期信号;(c)准周期信号;(d)瞬态信号

周期信号包括简谐信号和复杂周期信号。表述简谐信号的基本物理量有频率、振幅和初相位;复杂周期信号可借助傅里叶级数展成一系列离散的简谐分量之和,其中任意两个分量的频率比都是有理数。

非周期信号包括准周期信号和瞬态信号。准周期信号也是由一些不同离散频率的简谐

信号合成的信号,但它不具有周期性,组成它的简谐分量中总有一个分量与另一个分量的频率比为无理数。瞬态信号的时间函数为各种脉冲函数或衰减函数,如有阻尼自由振动的的时间历程就是瞬态信号,瞬态信号可借助傅里叶变换而得到确定的连续频谱函数。

如果描述系统状态的状态变量不能用确定的时间函数来表述,无法确定状态变量在某时刻的确切数值,其物理过程具有不可重复性和不可预知性,则称这样的物理过程是随机的,而阐述它们的测量数据就是随机信号,在数学上被称为随机过程。随机信号虽然具有不确定性,但却具有一定的统计规律性,可借助概率论和随机过程理论来描述。

在工程实践中,通常在相同的条件下,对某台设备(或同一型号的设备)进行大量的重复试验所得的试验数据进行统计分析,来研究其规律性。随机试验各次观测所得的时间历程函数的集合总体(母体、系集)就表达了该随机过程,并记为 $X(t)$,其中时间函数被称为样本函数(子样、样本)。随机过程的随机性是通过各个样本函数之间的区别以及这种区别的不可预测性体现出来的。因此,从理论上讲,要由许许多多乃至无穷的且时间区间应为无限长的样本函数组成的总体才能完整地表述随机过程。但在信号处理和分析时,我们只能获得有限数目的(个)、有限长度的样本记录,即

$$X(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\} \quad (2-1)$$

若随机信号的概率结构不随时间原点的选取而变化,则称 $X(t)$ 为平稳随机信号;反之,称之为非平稳随机信号。有关随机过程的知识可参阅相关书籍。

2.2 常用传感器及其原理

2.2.1 传感器及其分类

人通过感官来接收外界的信号,并将所接收的信号送入大脑,进行分析处理后获取有用的信息。对现有的或者正在发展中的机械电子装置来说,电子计算机相当于人的大脑(常被称为电脑),而相应于人的感官部分的装置就是传感器。所以说,传感器是人类感官的扩展和延伸,借助传感器人类可以探测那些无法直接用感官获取的信息。

传感器是一种获取信息的装置。它的定义是:借助于检测元件接收一种形式的信息,并按一定的规律将所获取的信息转换成另一种形式的信息的装置。它获取的信息可以为各种物理量、化学量和生物量,而转换后的信息也可以有各种形式,但目前传感器转换的大多为电信号。因而从狭义上讲,传感器被定义为:把外界输入的非电信号转换成电信号的装置。所以一般也称传感器为变换器、换能器和探测器,其输出的电信号继续输送给后续的配套的测量电路及终端装置,以便进行电信号的调理、分析、记录或显示等。在一个自动化系统中,首先要能检测到信息,才能进行自动控制,因此传感器是首当其冲的装置。

传感器一般由敏感器件与其他辅助器件组成。敏感器件是传感器的核心,它的作用是直接感受被测物理量,并将信号进行必要的转换输出。如应变式压力传感器的弹性膜片是敏感元件,它的作用是将压力转换为弹性膜片的形变,并将弹性膜片的形变转换为电阻的变化而输出。

传感器的种类繁多,在工程测试中,一种物理量可以用不同类型的传感器来检测;而同一种类型的传感器也可测量不同的物理量。机械工程中常用传感器的基本类型见表2-1所示。

表 2-1 机械工程中常用的传感器

传感器类型	名称	被测量	变换量
机械式	弹性转换元件	力、压力、温度	力、压力、温度 - 位移
电气式	电阻式传感器	位移	位移 - 电阻
	电阻丝应变片	力、位移、应变	形变 - 电阻
	半导体应变片	力、加速度	形变 - 电阻
	电容式传感器	位移	位移 - 电容
	电涡流传感器	位移	位移 - 自感
	电感式传感器	位移、力	位移 - 自感
	差动变压器	位移、力	位移 - 互感
	压电元件	力、加速度	力 - 电荷
	压磁元件	力、扭矩	力 - 磁导率
	热电偶	温度	温度 - 电势
	霍尔元件	位移	位移 - 电势
	光敏晶体管	转速、位移	光 - 电流
	热敏电阻	温度	温度 - 电阻

传感器的分类方法很多,按被测物理量来分,传感器可被分为位移传感器、速度传感器、加速度传感器、力传感器、温度传感器等。

下面重点介绍机械状态监测和故障诊断中的几种常用传感器。

1. 电阻应变式传感器

电阻应变式传感器简称电阻应变计,它是用高电阻率的细金属丝绕成如图 2-3 所示的栅状敏感元件 1,用黏结剂牢固地粘在基底 2、4 之间,敏感元件两端焊上较粗的引线 3,当将电阻应变计用特殊胶剂粘在被测构件的表面上时,敏感元件将随构件一起变形,其电阻值也随之变化,而电阻的变化与构件的变形保持一定的线性关系,进而通过相应的二次仪表系统即可测得构件的变形。通过应变计在构件上的不同粘贴方式及电路的不同连接,即可测得应力、变形、扭矩等机械参数。

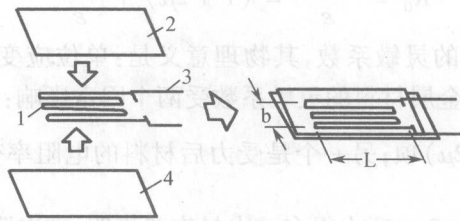


图 2-3 电阻应变计组成

1—敏感元件;2,4—基底;3—引线

金属电阻应变片的工作原理是基于金属导体的应变效应,即金属导体在外力作用下发生机械变形时,其电阻值随着金属导体所受机械变形(伸长或缩短)的变化程度而发生变化

的现象。

若金属丝的长度为 L , 截面面积为 S , 电阻率为 ρ , 其未受力时的电阻为 R , 则

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2-2)$$

式中 R ——金属丝的电阻值, Ω ;

ρ ——金属丝的电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;

L ——金属丝的长度, m ;

S ——金属丝的截面面积, mm^2 。

如果金属丝沿轴向方向受拉力而变形, 其长度 L 变化为 dL , 截面面积 S 变化为 dS , 电阻率变化为 $d\rho$, 因而引起电阻 R 的变化为 dR 。将式(2-2)微分, 整理可得

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-3)$$

对于圆形截面有

$$S = \pi r^2$$

所以

$$\frac{dS}{S} = 2\pi \frac{dr}{r} \quad (2-4)$$

$\frac{dL}{L} = \varepsilon$ 为金属丝轴向相对伸长, 即轴向应变; 而 $\frac{dr}{r}$ 则为电阻丝径向相对伸长, 即径向应变; 两者之比即为金属丝材料的泊松系数 μ , 有

$$\frac{dr}{r} = -\mu \frac{dL}{L} = -\mu \varepsilon \quad (2-5)$$

将式(2-5)代入式(2-4)得

$$\frac{dS}{S} = -2\mu \varepsilon \quad (2-6)$$

将式(2-6)代入式(2-3), 并整理得

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\mu) \varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2-7)$$

或

$$K_0 = \frac{dR/R}{\varepsilon} = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon} \quad (2-8)$$

式中, K_0 被称为金属丝的灵敏系数, 其物理意义是: 单位应变所引起的电阻相对变化。由式(2-8)可以明显看出, 金属材料的灵敏系数受两个因素影响: 一个是受力后材料的几何尺寸变化所引起的, 即 $(1 + 2\mu)$ 项; 另一个是受力后材料的电阻率变化所引起的, 即 $\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}$ 项。

对于金属材料, $\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon}$ 项比 $(1 + 2\mu)$ 项小得多。大量实验表明, 在电阻丝拉伸比例极限范围内, 电阻的相对变化与其所受的轴向应变是成正比的, K_0 为常数, 即

$$K_0 = 1 + 2\mu = \text{常数}$$

通常金属电阻丝的 $K_0 = 1.7 \sim 3.6$ 。

电阻应变计的主要参数有:

(1) 几何参数 表距 L 和丝栅宽度 b , 制造厂常用 $b \times L$ 表示;

(2) 电阻值 应变计的原始电阻值;

(3) 灵敏系数 表示应变计变换性能的重要参数;

(4) 其他表示应变计性能的参数, 如工作温度、滞后、蠕变、零漂、疲劳寿命以及横向灵敏度等。

金属电阻应变片分为丝式和箔式两种。金属丝电阻应变片的典型结构, 即丝式应变片基本结构见图 2-4 所示。它主要由黏合层 1、黏合层 3、基底 2、盖片 4、敏感栅 5、引出线 6 构成。

金属箔式应变片的敏感栅则是用栅状金属箔片代替栅状金属丝。金属箔栅采用光刻技术制造, 适用于大批量生产。金属箔式应变片具有线条均匀、尺寸准确、阻值一致性好、传递试件应变性能好等优点, 因此, 目前使用的多为金属箔式应变片, 其基本结构见图 2-5 所示。

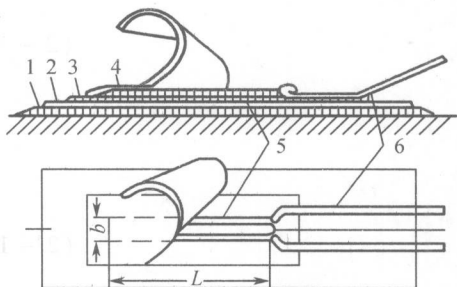


图 2-4 丝式应变片基本结构

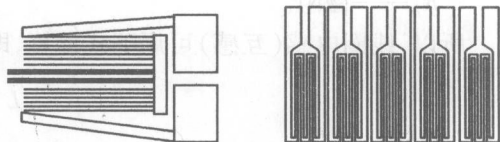


图 2-5 金属箔式应变片基本结构

电阻应变式传感器的应用主要体现在以下两个方面。

(1) 将应变片粘贴于被测构件上, 直接用来测定构件的应变和应力。例如, 为了研究或验证机械、桥梁、建筑等某些构件在工作状态下的应力、变形情况, 可利用形状不同的应变片, 粘贴在构件的预测部位, 测得构件的拉、压应力、扭矩或弯矩等, 从而为结构设计、应力校核或构件破坏的预测等提供可靠的实验数据。

(2) 将应变片贴于弹性元件上, 与弹性元件一起构成应变式传感器。这种传感器常用来测量力、位移、加速度等物理参数。在这种情况下, 弹性元件将得到与被测量成正比的应变, 再通过应变片转换为电阻变化的输出。这种传感器的典型应用见图 2-6 所示。图中所示为加速度传感器

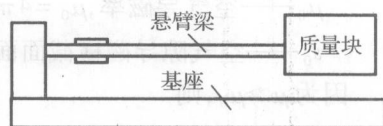


图 2-6 加速度传感器

传感器, 由悬臂梁、质量块、基座组成。测量时, 基座固定在振动体上, 振动加速度使质量块产生惯性力, 悬臂梁则相当于惯性系统的“弹簧”, 在惯性力作用下产生弯曲变形。因此, 梁的应变在一定的频率范围内与振动体的加速度成正比。

2. 可变磁阻式电感传感器

可变磁阻式传感器基本结构如图 2-7 所示, 它由线圈、铁芯及衔铁组成。在铁芯和衔铁之间有空气隙 δ 。根据电磁感应定律, 当线圈中通以电流 i 时, 产生磁通 Φ_m , 其大小与电流成正比, 即

$$W\Phi_m = L_i \quad (2-9)$$