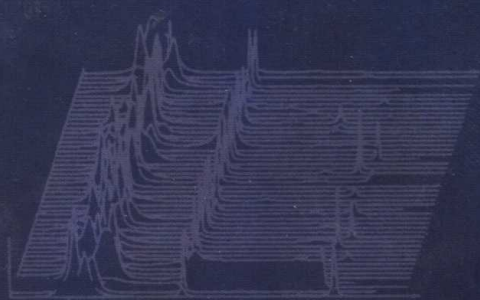


面向 21 世纪高等学校机电类专业教改教材

测试技术及应用

主编 刘经燕 副主编 王建萍 陈益瑞



华南理工大学出版社

面向 21 世纪高等学校机电类专业教改教材

测试技术及应用

主 编 刘经燕

副主编 王建萍

陈益瑞

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

十余年来,信息科学与材料科学的发展,制造技术与微电子技术、计算机技术的紧密结合,给测试技术课程赋予了新的内容和要求。本教材力求在教学大纲的要求内,在阐明工程测试技术基础理论的前提下,尽量介绍它的最新技术,以开拓读者的视野。

结合工程测试技术的实际及其发展,全书共分五章,内容包括:信号的获取,信号的中间变换和记录,常见工程量的测试,信号描述及处理,微机化测试分析仪及微机测试系统。

本书可作为高校机械工程类专业(特别是机械制造工程类专业)的本科生教材,也可供相近专业的大专、夜大、函大、高职类教学选用,亦可供研究生、有关教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

测试技术及应用/刘经燕主编. —广州:华南理工大学出版社, 2001.7
ISBN 7-5623-1715-1

I. 测… II. 刘… III. 测试技术-基本知识 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 25379 号

总 发 行: 华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼 邮编 510640)

发行电话: 020-87113487 87111048 (传真)

E-mail: scut202@scut.edu.cn <http://www2.scut.edu.cn/press>

责任编辑: 詹志青

印 刷 者: 江门日报印刷厂印装

开 本: 787×1092 1/16 印张: 11.75 字数: 280 千

版 次: 2001 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1~3 000 册

定 价: 22.00 元

版权所有 盗版必究

序

“测试”是人类认识自然、掌握自然规律的实践途径之一，是形成、发展和检验自然科学理论的实践基础。“测试技术”是科学研究中获得感性材料、接受自然信息的主要工具之一，是科学技术进步的重要支柱。

随着近代科学技术的迅速发展，特别是微电子技术及计算机技术的发展，“测试技术”所涵盖的内容更深刻、更广泛，它已涉及到许多科学领域，无论是生物、海洋、气象、地质、雷达、通信还是机械、电子等工程，几乎都离不开传感器技术和信号处理技术。

教学实践表明，在工科大学教育中，无论是本科、专科还是研究生教育，开设“工程测试技术”课程，对于学生掌握近代测试理论与技术、提高科研工作能力，都具有重要作用，是加强学生综合素质教育和创新能力培养的重要举措之一。

本书作者刘经燕等同志长期从事工程测试领域的教学与科研工作，该书既包含了他们教学工作的宝贵经验，亦包含了他们丰硕的科研成果。深信本书的出版，将对工科有关专业学生综合素质的培养和教学质量的提高产生良好的效益。

我应作者之邀，写此序言。祝愿作者们在进一步的教学与科研工作中取得更大的成就。并欢迎广大读者与同行对本书提出指正与建议，以帮助作者进一步做好工作。

杨叔子

2000年1月

前 言

本书是结合当前工程测试技术的实际和发展,为高等院校的机械工程类专业(特别是机械制造工程类专业)的“测试技术及应用”(或“测试技术与信息处理”)课编写的教材。“测试技术及应用”是机械工程类专业的一门主要技术基础课。

在内容安排上,本书力求符合读者的认识规律,并尽量避免与“机械控制工程基础”内容重复。其基本内容及安排如下:第一章介绍测试信号的获取;第二章阐述模拟信号的中间变换和记录;第三章介绍常见工程量(如位移、速度、压力、振动、噪声和温度)的测量方法;第四章介绍信号处理的基本知识;最后一章介绍微机化测试分析仪及微机测试系统。

本书由广东五邑大学刘经燕任主编,深圳大学王建萍、湛江海洋大学陈益瑞任副主编。绪论和第三章由刘经燕和熊焕庭(五邑大学)编写;第一章由陈益民(广东工业大学)和刘经燕编写;第二章由陈益瑞编写;第四章由王建萍、陈益民和熊焕庭编写;第五章由熊焕庭编写。由广东工业大学司徒忠教授和佛山大学阮世勋教授主审。

本书的编写工作是在司徒忠教授倡议与指导下完成的,广东工业大学郑莹娜教授对编写大纲提出了宝贵意见,中山学院给第三章提供了部分素材。华中科技大学(原华中理工大学)杨叔子院士和卢文祥教授对本书的编写予以支持和指导。在成书过程中五邑大学刘海刚、AP95081和AP96081班部分同学付出了辛勤劳动。编者对他们以及支持过此书编写工作的有关同志和领导及书末所列参考文献的作者表示衷心的感谢!

本书尚配有多媒体教学、实验CAI光盘,需要者可与编者联系。

由于编者的水平所限,新世纪教材的改革有待探讨,因此,书中肯定存在诸多缺点和错误,切望读者不吝指教,提出批评建议,我们由衷地欢迎和感激。

编 者

2001年2月

目 录

绪论	1
第一章 信号的获取	16
第一节 传感器的分类	16
第二节 电阻应变式传感器	17
一、工作原理	17
二、金属电阻应变片	18
三、半导体应变片	19
四、传感器实例	19
第三节 电感式传感器	20
一、自感型传感器	20
二、互感型传感器	23
三、传感器实例	24
第四节 电容式传感器	25
一、工作原理与类型	25
二、测量电路	28
三、传感器实例	28
第五节 压电式传感器	29
一、压电效应	29
二、压电材料	29
三、压电传感器的等效电路	30
四、测量电路	31
第六节 磁电式传感器	31
一、动圈式磁电传感器	32
二、磁阻式磁电传感器	33
三、传感器实例	33
第七节 半导体传感器	34
一、磁敏传感器	35
二、光敏传感器	36
三、热敏电阻	39
第八节 几种新型传感器	40
一、固态图像传感器(CCD)	40
二、光纤传感器	42
三、非晶态合金传感器	44

四、智能传感器简介·····	45
第九节 几种重要的传感检测技术·····	46
一、激光检测法·····	46
二、超声波检测技术·····	47
三、核辐射检测技术·····	48
四、声发射传感技术·····	49
习题1·····	50
第二章 信号的中间变换和记录·····	52
第一节 调制与解调·····	52
一、调幅与解调·····	53
二、调频与解调·····	57
第二节 滤波器·····	58
一、理想滤波器·····	59
二、实际滤波器的技术参数·····	59
三、RC滤波器·····	61
第三节 信号的记录·····	64
一、磁带记录仪·····	64
二、新型记录仪·····	67
习题2·····	69
第三章 常用工程量的测试·····	71
第一节 位移的测量·····	71
一、常用位移传感器·····	71
二、光栅数字位移传感器·····	72
三、角位移传感器·····	75
四、位移测量实例·····	78
第二节 速度的测量·····	79
一、线速度的测量·····	80
二、角速度的测量·····	81
第三节 力与压力的测量·····	82
一、力的测量·····	82
二、压力的测量·····	85
第四节 振动测试·····	89
一、单自由度系统的强迫振动·····	89
二、测振传感器·····	91
三、振动的激励及激振器·····	94
四、振动测试的实例·····	97
第五节 噪声测试·····	99
一、噪声的度量·····	99
二、噪声测试常用仪器·····	102

第六节 温度测量	104
一、温度、温标及常用测温方法	104
二、热电偶测温	105
三、热电阻测温	108
四、热电偶及热电阻的测温电路	109
五、热电偶和热电阻的校验	109
习题 3	110
第四章 信号描述及处理	111
第一节 信号的分类与描述	111
一、信号的分类	111
二、信号的描述	113
第二节 周期信号	113
一、周期信号的时域描述	113
二、周期信号的频域描述	113
三、周期信号的幅值描述	119
第三节 非周期信号	120
一、工程常见非周期信号的时域描述	120
二、非周期信号的频域特性	122
第四节 随机信号	128
一、随机信号的幅值描述	128
二、随机信号的时域描述	131
三、随机信号的频域描述	133
第五节 信号数字化	135
一、采样	135
二、截断	138
第六节 有限离散傅里叶变换与快速傅里叶变换	140
一、有限离散傅里叶变换(DFT)	140
二、快速傅里叶变换(FFT)	141
三、FFT 的参数选择	141
第七节 基于 FFT 的谱分析方法	142
一、确定性信号的傅里叶谱	142
二、随机信号的自功率谱密度分析	143
三、互谱密度分析和频率特性分析	143
四、相干函数分析	144
第八节 相关分析和谱分析的工程应用	144
一、相关分析及其应用	144
二、谱分析的工程应用	147
第九节 数字滤波简介	149
一、数字滤波的数学模型	149

二、调用数字滤波子程序的几个问题	150
习题 4	151
第五章 微机化测试分析仪及微机测试系统	153
第一节 概述	153
一、模拟式仪器、数字式仪器和微机化仪器	153
二、微机化测试分析仪的优点	153
三、微机化测试分析仪的发展	154
第二节 计算机辅助测试	154
一、信号采集子系统	155
二、PC 机的 ADC 插卡	157
三、模拟输出与 DAC 插卡	158
四、微机型数据采集分析系统	158
第三节 专用微机化测试分析仪	158
一、专用微机化测试分析仪的特点	158
二、专用微机化仪表	159
三、基于 DSP 的专用数字信号分析仪	159
第四节 虚拟仪器技术	159
一、使用者自己构建的仪器	160
二、虚拟仪器(系统)的构成	160
三、虚拟仪器软件开发平台 LabVIEW	161
四、自己构建一个简单的虚拟仪器	164
五、虚拟仪器的例子	169
第五节 自动测试系统	169
一、自动测试系统的特点及形式	170
二、测试系统的主要通信接口	171
附表	176
参考文献	177

绪 论

经数百万年蒙昧、数千年农耕、几百年工商,人类社会已进入当今的信息时代。社会的发展基于人类对客观世界的不断认识。同时,人类对客观的认识能力也随社会的发展而发展。测试,则正是人类认识客观世界的主要手段。

测试包括测量和试验。测量是以确定被测属性量值为目的的全部操作,测试则是具有试验性质的测量。例如,为了解周边工厂的设备噪声对生活区环境的影响,人们可用声级计实测生活区的噪声,这是对环境噪声的测量。但若需要进一步了解噪声的传播途径、确定周边的哪些设备对生活区的环境噪声贡献最大,或需要提出降噪措施,则要以试验的方式,安排设备的运行顺序和工况,在设备与生活区之间布置更多的振动和噪声测点,并对所测的信号进行深入的分析(如频谱分析、相关分析),才能得到较客观的认识。这一带试验性质的测量则称为测试。因此,测量多属被动的、静态的、较孤立的记录性操作,而测试则是主动的、涉及过程动态的、较系统的记录与分析的操作。

一、测试技术在机械工程中的广泛应用

随着近代科学技术(特别是信息科学、材料科学、微电子技术和计算机技术)的迅速发展,测试技术所涵盖的内容更加深刻、更加广泛。现代人类的社会生产、生活、经济交往和科学研究都与测试技术息息相关。各个科学领域,特别是生物、海洋、航天、气象、地质、通信、控制、机械和电子等,都离不开测试技术,测试技术在这些领域中也起着越来越重要的作用。因此,测试技术已成为人类社会进步的一个重要基础技术,是各学科高级工程技术人员必须掌握的重要的基础技术。以下介绍测试技术在机械工程的几个主要方面的应用。

1. 产品开发和性能试验

新产品开发是企业活力的主要体现。一个新产品,从构想到占领市场,必须经过设计、试制、质量稳定的批量生产等过程。目前,随着各专业领域设计理论的日趋完善和计算机数字仿真技术的逐渐普及,产品设计也日趋完美。但真实的产品零件、部件、整机的性能试验,才是检验设计正确与否的唯一依据。许多产品都要经过设计、试验、再修改设计、再试验的多次反复。即使已定型的产品,在生产过程中也需要对每一产品或其部分样品作性能试验,以便控制产品质量。用户验收产品的主要依据也是产品的性能试验结果。

例如,滚动轴承生产厂应按行业规定,对其生产的轴承作寿命及可靠性试验。图1所示是基于PC机的试验系统框图。在一台滚动轴承疲劳试验机上装有四套试验轴承,液压机构给轴承加载至规定负荷。四个温度传感器分别测出各轴承的试验温度,与环境温度比较获得试验温升。由安装在试验机上的振动传感器测出试验机的振动。PC机每隔一小时自动巡回检测一次,在屏幕上显示温升和振动的时间历程。一台PC机可监控多台轴承疲劳试验机。当某一轴承温升或某台试验机振动超过预设定值时,PC机发出信号,送至控制电动机的继电器,使该试验机暂停工作,同时报警。试验人员对现场判断后,作出继续试验或

取下失效轴承、对剩下轴承继续试验等选择,直到数百小时的试验全部完成。试验记录由计算机保存,并按规定作进一步的处理和分析。实际工程中,对一台机器,往往要对其主轴、传动轴作扭转疲劳试验;对齿轮传动系统,要作承载能力、传动精确度、运行噪声、振动、机械效率及寿命等试验;对洗衣机等机电产品,要作运行噪声、振动、电控件寿命试验;对柴油机、汽油机等,要作噪声、振动、油耗、废气排放等试验。对某些在冲击、振动环境下工作的整机或部件,还需模拟其工作环境进行试验,以证实或改进它们在此环境下的工作可靠性。例如,汽车空调压缩机,巷道掘进机的电控箱,需放在专门的电液伺服振动台上,由计算机控制振动台,在一定的误差范围内模拟实际工况振动。试验车辆,或在专门模拟各种路面的试车场作长时间行驶,或前后轮均支承在专门的试验台上试验,以检验主要构件和各零部件的可靠性。机器及其零部件的性能试验,是产品性能试验中的重要部分。

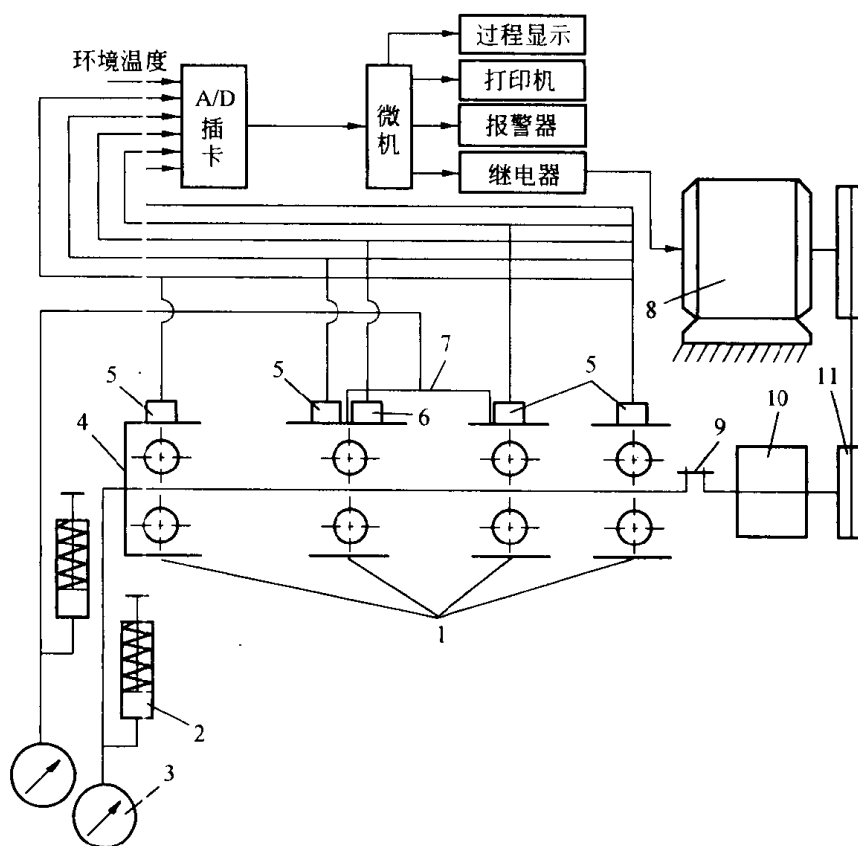


图1 滚动轴承寿命及可靠性试验系统

1—轴承;2—手动螺旋液压器;3—压力表;4—轴向加载部件;5—温度传感器;6—加速度传感器;7—径向加载部件;8—电机;9—联轴器;10—增速器;11—皮带传动机构

控制系统已是大多数近代机械设备不可少的一部分。对各种特定的控制系统及其关键元件,都应进行静、动态特性的试验,如系统灵敏度、时间常数、过渡过程品质、频率特性等测试和仿真试验等。较详细的要求请参阅有关书籍。

对许多机器设备或工程结构(如精密机床、高速汽轮机转子、高层建筑、海洋钻井平台等),限制其振动效应或提高其抗振性能,一直是人们追求的重要目标。为此,必须进行结构的动态试验。一种试验方法是在机器或结构的运行或使用状态测量其适当部位的振动,并对所测数据进行分析,对动态品质作出评价,提出补救措施或改进意见。另一种方法是在样

机或结构模型上选取多个激振点和拾振点,在激振点上施加特定的激励,同时测量激励和拾振点振动响应,所测数据经处理分析,可获得更准确、更全面的结构动态信息,如各阶模态频率、模态振型及模态阻尼等。目前多用有限元分析方法来进行结构的静力、动力计算分析,但计算模型的简化和边界条件的处理,使计算模型与实际结构总有较大差异。若进一步经结构模态试验,对有限元模型进行修改,将使设计更符合实际。像汽车、飞行器、船舶、水轮机、高层建筑、桥梁等大型复杂重要结构,现多采用有限元分析和结构模态试验相结合的设计方法。计算机直接调用试验模态参数,进行动力学修改和优化,使结构动态特性达到预定的要求。

2. 质量控制与生产监督

产品质量是生产者关注的首要问题。机电产品的零件、组件、部件及整体的各生产环节,都必须对产品质量加以严格控制。从技术角度而言,测试(工业生产中常称为检测)则是质量控制与生产监督的基本手段。

例如,冰箱的旋转式压缩机,对其气缸、叶片、活塞三个主要零件的配合间隙有较高的要求。生产中,先按稍低的公差要求加工三个零件,再对它们相互配合尺寸作测量、分组,最后按规定配合间隙选配,既保证质量又降低生产成本。压缩机三个主要零件尺寸自动选配线的组成框图如图2所示。其中,叶片分选机和活塞分选机分别测量叶片和活塞的有关尺寸,并按 $1\mu\text{m}$ 的间隔分组,然后送入各自料库的分组箱和选配站,供选配时用。气缸检验机对缸体厚度和槽宽作测量,主计算机按缸体所测值和规定的间隙要求,算出配合件(活塞和叶片)所需尺寸,指出所在分组箱位置,由皮带输送机送出供装配。选配线以12s为一工作循环。

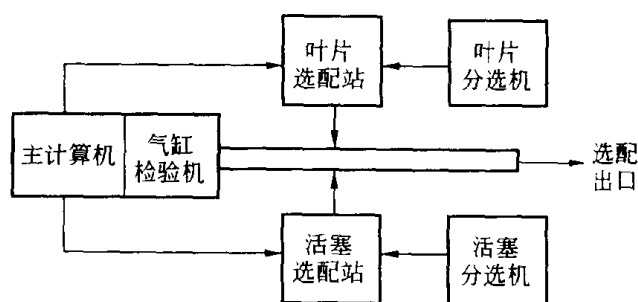


图2 旋转式压缩机主要零件选配线组成框图

该选配线采用非接触式气动测量,如图3所示。压缩空气通过主喷嘴由测量喷嘴喷向工件表面,不同的工件尺寸在工件表面与测量喷嘴间产生不同大小的环形气隙,造成测量喷

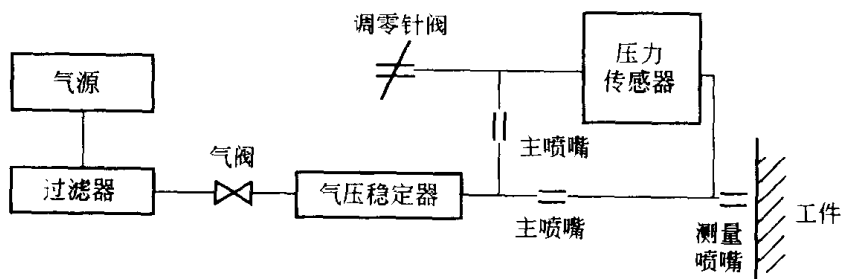


图3 气动测量原理图

嘴与主喷嘴之间气室的压差变化,经压力传感器转换为电信号,由计算机采集和处理,得到被测尺寸值。

因环境保护的要求,噪声已成为滚动轴承质量优劣的主要指标之一,轴承厂必须严格控制轴承产品的噪声。一方面,必须检测出厂轴承噪声,分级销售;另一方面,应对检测结果作各种分析,以寻求降低噪声的措施,可用图4所示的滚动轴承振动检测仪及分析仪。该仪器拾取轴承振动信号,送至计算机作分析处理。在检测线上的快速分析结果(振动均方根值、峰值因子、峭度等)可对轴承噪声分级;对高噪声轴承振动信号的进一步分析,可找寻出噪声产生的主要原因;批量轴承噪声品质的统计数据,可用来进一步分析产品总体质量与各工序间的相关关系。

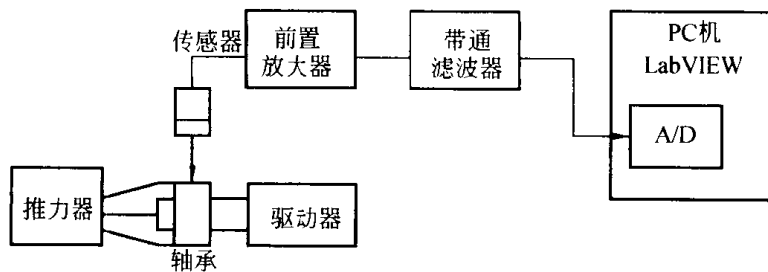


图4 滚动轴承振动检测仪框图

机械加工和生产流程中的在线检测与控制技术,把产品废品消灭在萌芽状态,以力保产品全部合格。例如,外圆直径测量仪,可按磨削工艺要求,检测磨削工件尺寸并控制磨削(粗磨—精磨—无进给磨削—退出工件—进入下一循环)工艺过程;带钢热轧机组,在线检测并自动控制带钢厚度、宽度,监测带钢表面质量等。在线检测提高劳动生产率,减轻劳动强度,降低成本,因此,在工业生产中获得了广泛的应用。

随着传感器技术、微电子技术和计算机技术的发展,在线检测从制造业扩展到冶金、化工、能源、交通运输和航天航空等行业;检测参数从单参数到多参数;检测对象从单机到成套机械以至整个车间设备;自动化程度从简单的闭环控制到以计算机为基础的多参数综合监控和故障自动诊断。如发电厂,通过对发电机组转速、振动、轴和机壳热胀冷缩位移、机组绝缘状况、冷却系统泄漏、润滑油成分等的在线监测,以确保发电厂的高效、安全运行。核电站对关键零部件是否松动、松动件跌落到什么地方都要作在线监测。大型船舶上的在线监测系统,需监测船上轮机和发电机等设备运行状态、船体振动及关键构件的应变及应力、冷藏货物状况等。大型民航客机上的“黑匣子”,就是一个难以摔坏的数据记录装置,记录着大气压力、气流速度、飞行航向、飞行速度、发动机及各种设备运行状态以及与控制台通信的各种数据。

3. 机械故障诊断

机械故障诊断是工程诊断的重要组成部分,它源于现代工业生产对机器设备及其零件的高可靠性和高利用率要求。如石油、化工、冶金等工业生产中,大型传动机械、压缩机、风机、反应塔罐、炉体等关键设备,一旦因故障停止工作,将导致整个生产停顿,造成巨大的经济损失。因此,在这些设备的运行状态下,人们就要了解、掌握其内部状况。一方面,尽可能利用并延长其安全使用寿命;另一方面,根据其预测的剩余寿命,安排好维修的方式、时间和所需准备的零部件等。

医生对人体内部器官作疾病检查,一般是根据多种化验、检测结果,结合症状来作出诊

断的。同样,在设备的运行状态或不拆卸状态对其内部状况作出诊断,也是利用机器在工作或试验过程中出现的诸多现象(如温升、振动、噪声、应力及应变、润滑油状况、异味等)来分析、推理、判断的。显然,完善的测试是正确诊断的基础。

例如,滚动轴承是机器中常用易损件之一,人们一般不是将机器中的轴承拆下来,再将轴承拆开,分别检验它们的各个零件,去找寻它们缺陷的性质和所在位置。经大量分析、总结,人们认识到滚动轴承失效的基本方式有六种:磨损、疲劳、腐蚀、断裂、压痕和胶合。与正常轴承相比,失效轴承会产生各种特征的振动或发射声。因此,若能发现与某种失效形式对应的振动或发射声的特征,就可以判断运行轴承的状态。为此,要以适当的方式拾取振动或发射声(如用加速度传感器拾取轴承座的振动,用位移传感器直接拾取轴承套圈的表面振动);从混杂着大量机器振动和噪声的信号中提取轴承所引起的振动或噪声;对提取的信号进行特征分析(如时域统计、频谱等);必要时,还需作一些试验,如拾取力锤敲轴承座的信号。可见,测试是诊断的前题和基础。随着测试水平的不断提高,目前不少滚动轴承诊断仪的辨识准确率已达到 98% ~ 99%。

20 世纪 60 年代,机械故障诊断技术多用于航天、军工等领域,以后逐步推广到核能设备、动力设备(如车用发动机、汽轮机、压缩机)、加工机械(如各种机床的电气控制系统、气动及液压传动部件、机械机构等)、运输机械(如火车车轴箱温升)、压力容器和输送管道系统(如自来水管道的渗漏)等。

二、测试系统的组成

从上述大量应用实例可知,测试的基本任务是获取有用的信息。而信息又是蕴涵在某些随时间或空间变化的物理量(即信号)之中的。因此,首先要检测出被测对象所呈现的有关信号,再加以分析处理,最后将结果提交给观察者或其他信息处理装置、控制装置。

信号,就其具体的物理性质而言,有位移信号、速度信号、加速度信号、力信号、光信号和电信号等。从信息的提取和信息的采用来看,目前以电信号最为方便。因此,各种非电信号多被转换为电信号,再传输、处理和运用。

工程信号多随时间或空间而变化。为用数学工具对信号作准确、定量的描述、分析及研究,测试技术中将信号统一抽象为时间的函数。

一般情况下,一个测试系统的组成可用图 5 所示的框图来表示。

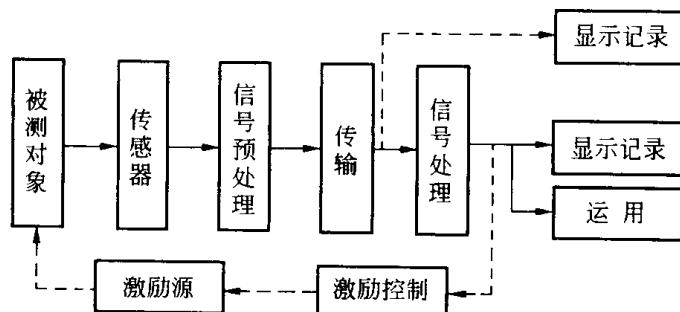


图 5 测试系统框图

1. 激励源

激励源是向被测对象输入能量,激发出能充分表征有关信息又便于检测的信号装置。

有些试验,被测对象在适当的工作状态下可产生所需的信号。而某些试验,则需用外部激励装置对被测对象进行激励,如机床振动模态试验,需用专门的激振器对机床激振。

2. 传感器

传感器是能感受规定的被测量并按一定规律转换成同一种或另一种输出信号的器件或装置。传感器通常由敏感元件和转换元件组成。敏感元件直接感受被测量,转换元件将敏感元件的输出转换为适于传输和测量的信号。许多传感器中这二者是合为一体的。

3. 信号的中间变换

信号的中间变换是将传感器输出信号转换成便于传输和处理的规范信号。因为传感器输出信号一般是微弱且混有噪音的信号,不便于处理、传输或记录,所以一般要经过调制、放大、解调和滤波等调理,或作进一步的变换,如将阻抗的变化转换为电压或频率的变化,将模拟信号转换为数字信号等。

对一些重要测试项目,需要将变换后的信号记录下来,作原始资料保存,或显示出来供测试者观察。

4. 信号处理

信号处理即将中间变换的输出信号作进一步处理、分析,提取被测对象的有用信息。

5. 显示记录或运用

将处理结果显示或记录下来,供测试者作进一步分析。若该测试系统就是某一控制系统中的一个环节,处理结果将直接被运用。

测试系统的组成与研究任务有关,并不一定都包含图 5 所示的所有环节。

三、有关测试装置的常用术语

在下面的章节中,将会遇到一些常用术语,在此作简单介绍。此处所指的测试装置,是一个广义的概念,包括图 5 所示的测试系统或环节。

1. 量程和测量范围

量程是指测试装置示值范围的上、下之差;测量范围是指该装置在规定的极限误差范围内所能测量的被测量的范围,对于动态测试装置,要给出频率的测量范围。

2. 测试装置的误差

(1) 测试装置的误差

测试装置的指示值与被测量的真值的差值,称为装置的示值误差,可简称为测试装置的误差,即

$$\text{示值误差} = \text{指示值} - \text{真值} \quad (1)$$

在实际测量中,被测量的真值是不知道的,通常用实测值的算术平均值或满足规定准确度测量值作为真值。例如,用一级精度压力表去检定二级精度压力表,那么一级精度压力表的测量值就作为二级精度的压力真值使用。

(2) 引用误差

在实际工作中反映测试装置质量的最常用的综合性指标是装置的引用误差,即

$$\text{引用误差} = \frac{|\text{指示值} - \text{真值}|_{\max}}{\text{装置的满量程}} \times 100\% \quad (2)$$

3. 测量误差

反映测量工作的最常用的一个指标是测量误差,即

$$\text{测量误差} = \frac{\text{装置指示值} - \text{真值}}{\text{真值}} \times 100\% \quad (3)$$

若有相同的示值误差,指示值愈小,相应的测量误差愈大。例如,测量 100 mm 和 10 mm 长度,如果示值误差都是 0.01 mm,显然 10 mm 的测量误差大,也就是说,它的测量精度低。因此,在选用测试装置时应注意使它的量程与被测量的大小相适应,最好是被测量接近满量程处,至少也要在满量程的 1/3 以上,才能得到较好的测量精度。

4. 信噪比

信噪比是信号功率 P_s 与噪声功率 P_n 之比,用 SNR 表示:

$$\text{SNR} = 10\lg(P_s/P_n) \quad (4)$$

也常用信号电压 V_s 和噪声电压 V_n 来表示信噪比:

$$\text{SNR} = 20\lg(V_s/V_n) \quad (5)$$

5. 准确度

准确度表示测量结果与被测量真值之间的一致程度。误差越小,测量结果愈准确。

四、测试装置的基本特性

为从测试装置输出中识别其输入,必须研究测试装置输出、输入及测试装置三者之间的关系,如图 6 所示。图中 $x(t)$ 为输入量(即被测信号), $y(t)$ 为对应的输出(即测出信号), $h(t)$ 表示测试装置的传输特性。工程测试一般总是希望测试装置的测出信号能不失真地反映被测的信号,为此对测试装置的传输特性提出了一些基本要求。

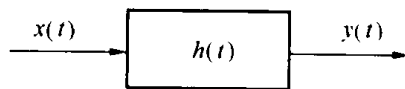


图 6 测试装置方块图

理想的测试装置传输特性应该具有单值的、确定的输入—输出关系,并以输入—输出呈线性关系为最佳。对于静态测试,一般只要求测试装置的静态特性是单值函数,不一定是线性关系;而对于动态测试,则要求测试装置传输特性必须是线性的,否则输出信号会产生畸变。

然而,实际的测试装置只能在允许误差范围内和一定的工作范围内满足这一要求。为评定测试装置传输特性,需在静态特性和动态特性两方面对测试装置提出性能指标要求。

1. 测试装置的静态特性

测试装置的静态特性是指被测信号 $x(t)$ 为常值时,其测出信号与被测信号之间所呈现的关系。

工程中常用线性度、灵敏度和回程误差等指标来描述,它们能从不同的方面反映实际测试装置的静态特性。

(1) 线性度

线性度是指测试装置的输出与输入的比值保持常值比例关系的程度。

在进行测试装置静态标定时,一般用实验来确定其输出—输入的对应关系。由此所绘制的曲线称为标定曲线。对该曲线可用多种方法(如端直法、最小二乘法等)拟合出一直线,如图 7 所示。若在测试装置输出满量程范围 A 内,标定曲线与拟合直线的最大偏差为 B ,则线性误差可表示为

$$\text{线性误差} = \frac{|B|}{A} \times 100\% \quad (6)$$

(2) 灵敏度和灵敏度阈

灵敏度是测试装置输出变化量 Δy 与输入变化量 Δx 的比值,即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (7)$$

它表征测试装置对输入量变化的反应能力。显然,测试装置的标定曲线的斜率就是其灵敏度。理想的测试装置的灵敏度为常数。而一般的测试装置,灵敏度是一个变量,此时常用拟合直线的斜率作为该测试装置的灵敏度。

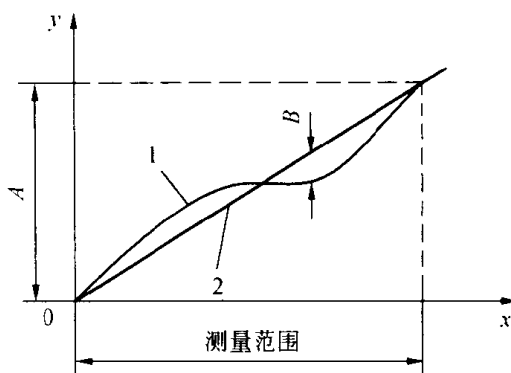


图7 线性度表示

灵敏度的量纲由输入和输出的量纲决定。当它们的量纲相同时,灵敏度又称“放大倍数”或“增益”。

有些测试装置还使用灵敏度阈,它是测试装置输出值产生一可察变化的最小输入量变化值,描述了测试装置对输入微小变化的响应能力。

有指示装置的测试装置使用“分辨率”,它是指示装置有效的辨别紧密相邻量值的能力,一般认为数字装置的分辨率是最后两位数的一个字,模拟装置的分辨率是指示标尺分度值的一半。

(3) 回程误差

许多测试装置,输入量增加时(正行程)的标定曲线与输入量减少时(反行程)所得的标定曲线往往不重合,如图8所示。为表征测试装置在全量程范围内正、反行程静态特性的不一致程度,用回程误差来度量,其值可用同一输入量相对应的正、反行程两输出量值的最大差值 $h_{\max}$ 与满量值 A 之比的百分数表示,即

$$\text{回程误差} = \frac{h_{\max}}{A} \times 100\% \quad (8)$$

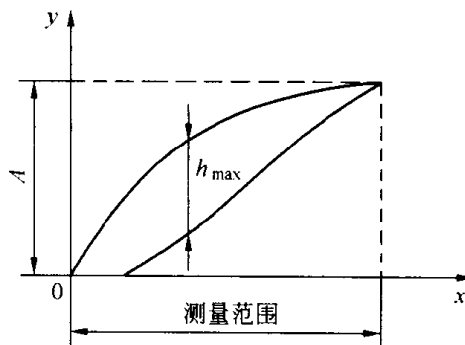


图8 回程误差表示

2. 测试装置的动态特性

本书讨论测试装置的动态特性,仅限于它是线性定常系统这种情况。对于图6所示的测试装置,能用线性常微分方程来描述其输入、输出关系,即

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) \\ = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $a_n, a_{n-1}, \cdots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \cdots, b_1, b_0$ 是由测试装置参数决定的常数。对线性定常系统,它具有表1所示的特性。