



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

主编 / 李汝勤 宋钧才

纤维和纺织品 测试技术

(第三版)



附DVD光盘

东华大学出版社

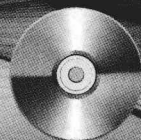
十一五

纤维和纺织品 测试技术

(第三版)

◎ 编著

李汝勤 宋钧才 朱 浩
陈跃华 刘若华



附DVD光盘

清华大学出版社

47071

图书在版编目(CIP)数据

纤维和纺织品测试技术/李汝勤,宋钧才主编. —上海:东华大学出版社,2009.7

ISBN 978-7-81111-576-5

I. 纤... II. ①李... ②宋... III. ①纤维—测试
②纺织品—测试 IV. TS101.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 102468 号

责任编辑 张 静

封面设计 戚亮轩

纤维和纺织品测试技术

(第三版)

李汝勤 宋钧才 主编

东华大学出版社出版

上海市延安西路 1882 号

邮政编码:200051 电话:(021)62193056

新华书店上海发行所发行 苏州望电印刷有限公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:23.5 字数:578 千字

2009 年 8 月第 3 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

印数:0001—4000

ISBN 978-7-81111-576-5/ TS • 130

定价:49.00 元

三版前言

纤维和纺织品的生产,在国民经济和人民生活占有重要地位。随着纤维工业的迅速发展,纤维和纺织品日益丰富多彩,品种不断增加,性能不断改善。穿着用纺织品不但要有外观美感、风格和穿着舒适性,而且要符合生态安全要求。装饰用和产业用纺织品的需求量也在增加,对纺织品的阻燃、抗静电、隔热等性能也提出了新的要求。纺织品所表现出来的各种特性,是和组成它的纤维品种、纱线和织物的结构以及织物后整理工艺等多方面因素有关。为了能生产品质优良且符合使用要求的纺织品,研究开发新型纺织纤维材料,纤维、纱线和织物结构和性能的测试十分重要。

随着科学技术的进步,纺织测试技术有了很大发展。新的测试方法、新型传感器以及计算机技术的应用,使纺织测试技术发展到了一个新的阶段,出现了不少功能齐全、自动化程度高、数据处理能力强以及结构精密的测试设备。由于纤维和纺织品的结构和性能是多方面的,纺织测试仪器的种类十分繁多,同一类型的仪器也在不断更新换代。如果能深入地掌握仪器的测试原理和测试技术的基本要求,就能在使用中更好地把握仪器的性能,在科学研究中更好地发挥它的作用。

纤维和纺织品的测试不仅和纺织、化纤和服装工业有关,还和轻工业、建筑材料等其他工业用纺织材料有关,与农业和畜牧业的培育改良品种有关,与贸易中的商品交换验收和定价有关,与军用被服、特种纺织品以及航天服研究有关,和纺织院校教学科研关系密切。纤维和纺织品测试技术在国民经济、科学技术和国防工业等各个领域中的应用是十分广泛的。

在编写中,本书由浅入深、较系统地阐明了纤维和纺织品测试的基本原理,对国内外发展的新测试方法和典型仪器进行介绍,使其既有理论,又有应用实践;既有广度,又有深度。编写中注意其内容能适合不同类型人员的需要。在第一版和第二版的出版基础上,根据教学和研究工作需要对原书多章内容进行了修改和充实。

本书是一本内容较为完整的纺织测试技术书籍,是涉及基础和专业知识和多学科交叉的教科书,可供纺织院校本科生、研究生作为教材,也可供生产企业、测试中心、检验机构和研究单位专业技术人员阅读参考。

为了提高学生使用教材进行学习的直观效果,本书第三版开始附加教学光盘,内容除提供便于教师讲课的各章 PPT 外,重点对反映测试技术发展的以下四部分内容进行实际操作录像:(1)新纤化学纤维测试系统;(2)乌斯特棉纤维测试系统;(3)生态纺织品测试技术;(4)纤维结构分析技术。

本书由李汝勤教授、宋钧才高级工程师、朱浩教授、陈跃华教授和刘若华博士编写。全书由李汝勤教授和宋钧才高级工程师主编和负责定稿。

张渭源教授、严文源高级工程师、王正伟副教授、纪峰博士和博士研究生黄新林等对本书的编写给予了帮助,在此表示感谢。

在光盘内容的摄制过程中,得到了上海市纤维检验所、瑞士乌斯特技术公司、东华大学分析测试中心、上海新纤仪器有限公司等单位的大力协助,在此表示感谢。

由于纺织测试技术发展迅速,编者水平有限,本书在编写中有不当之处,望读者批评指正。

编者

2009.6

目 录

第一章 测量方法与误差	1
第一节 概述.....	1
第二节 测量误差.....	3
第三节 仪器的静态和动态特性.....	6
第四节 试样误差	12
第五节 异常值处理和试验方法精密度估计	16
第六节 测量结果的不确定度	27
第二章 纤维长度、卷曲和热收缩测试	30
第一节 纤维长度测量概述	30
第二节 单根纤维长度测量	32
第三节 梳片式和罗拉式长度测量仪	34
第四节 光电式长度测量方法与仪器	40
第五节 电容式长度测量方法与仪器	49
第六节 纤维卷曲性能测试	51
第七节 变形丝卷缩性能测试	53
第八节 纤维热收缩率测试	55
第九节 加弹丝自动测试系统	58
第三章 纤维细度、成熟度和异形度测试	60
第一节 纤维细度测量概述	60
第二节 气流法测量纤维细度	62
第三节 光学投影法测量纤维细度	70
第四节 光电法测量纤维细度	75
第五节 振动法及声学法测量纤维细度	81
第六节 棉纤维成熟度测试	83
第七节 化学纤维异形度测试	94
第四章 纺织材料强伸性能测试	99
第一节 纺织材料的强伸特性	99
第二节 机械式强力仪.....	104
第三节 电子强力仪原理与结构.....	110
第四节 纺织材料耐磨性能和摩擦系数测试.....	117

第五章 纱线捻度、毛羽和直径测试	123
第一节 纱线捻度测试	123
第二节 纱线毛羽测试	128
第三节 纱线直径测试	132
第六章 纱条不匀和疵点测试	135
第一节 纱条不匀及其测量方法	135
第二节 纱条不匀率与变异—长度曲线	138
第三节 电容均匀度仪测量原理	145
第四节 纱条不匀波长谱分析	154
第五节 纱条疵点测试	163
第六节 纱线光电测量分析系统	165
第七章 纺织材料吸湿和电学性质测试	167
第一节 纺织材料吸湿概述	167
第二节 干燥法吸湿测量	171
第三节 间接测湿法	175
第四节 纤维比电阻测量	181
第五节 纺织材料静电测量	183
第八章 纺织材料颜色和光泽测试	191
第一节 概述	191
第二节 视觉与颜色的性质	192
第三节 CIE 表色系统	197
第四节 CIE UCS 均匀色空间与色差计算	201
第五节 颜色测量与仪器	205
第六节 纺织品光泽测量	217
第九章 织物风格的客观评定	222
第一节 概述	222
第二节 织物抗弯刚度、悬垂性和抗折皱性测试	224
第三节 单台多指标式织物风格仪	229
第四节 多台多指标式织物风格仪	232
第十章 纺织品热湿传递和透气性测试	237
第一节 织物热传递性能及其测试	237
第二节 织物湿传递性能及其测试	244
第三节 织物透气性测试与仪器	251

第十一章	纺织品阻燃和色牢度测试	255
第一节	纺织品阻燃和抗熔融性测试.....	255
第二节	纺织品色牢度测试.....	265
第十二章	纺织品其他性能测试	275
第一节	织物拉伸断裂测试与仪器.....	275
第二节	织物起球和勾丝测试与仪器.....	278
第三节	织物尺寸变化率测试.....	283
第四节	纺织品防紫外线性能的评定.....	287
第十三章	生态纺织品测试	289
第一节	概述.....	289
第二节	纺织品中有害物质的检测方法.....	291
第三节	纺织品中有害物质的测试仪器.....	296
第十四章	纺织纤维鉴别和混纺比测定	304
第一节	纺织纤维鉴别.....	304
第二节	混纺比测定方法.....	319
第十五章	纤维结构分析	330
第一节	电子显微镜分析.....	330
第二节	红外光谱分析技术.....	338
第三节	X射线衍射分析.....	348
第四节	热分析技术.....	359

第一章 测量方法与误差

第一节 概 述

科学技术日益发展,不论是基础学科还是应用科学研究,都离不开测试仪器。工农业生产、医疗卫生事业以及人们生活的各个领域,普遍使用仪器进行检验和测量。仪器可以帮助人的感官,使人们突破生理上的限制,深入认识客观事物的本质和规律,以便对生产过程进行监督和控制,最终生产出质量优良的产品。

仪器有许多分类方法,根据其作用来分有测量仪器、计数与积算仪器、转换与放大仪器、指示仪器、记录仪器和控制仪器等。

仪器根据其原理不同,可以分为力学类、光学类、电学类和化学类仪器等。根据应用范围不同可以分为通用仪器和专用仪器。

在纺织检验和科学研究中所用仪器种类很多,如纤维有长度、细度、卷曲、热收缩和纤维力学、光学、电学、热学性质的测试;纱线有细度、强力、捻度、均匀度、纱疵、毛羽的测试;织物有厚度、耐磨、色泽、风格、热湿传递、透气透水和阻燃、抗静电、染色牢度的测试等。由此可见,纺织科学技术领域中测试仪器的应用是十分广泛的。

纤维和纺织品在检验中采用两种方法:一种是感官检验法,主要根据检验人员的目光和触觉进行判断,或把试样与标准样品进行比较评定。这种方法简单迅速,但所得结果与检验人员的感觉和经验有关,带有主观因素的影响,检验人员之间可能存在系统偏差。另一种是仪器检验法,可以进行客观评定并能得到测量结果的数字指标,但一种仪器所测结果往往只代表被测对象的某一项性质,而不能对被测对象进行综合性评定。实际应用要根据被测对象的测试精度要求和实际可能性进行选择。随着测试技术的进步,采用仪器进行检验则是发展的趋势。

在对产品质量的监控中,需抽取一定数量样品在实验室内进行试验,根据试验结果对生产工艺进行调整。这样的过程有时要反复多次,才能达到稳定的产品质量,控制周期较长。另一种方法是在生产现场将仪器直接装在机台上,对半成品或成品的质量进行连续测量,可以及时提供产品质量信息,称为在线检测。在线检测方法的进一步发展,是将测量所得信号直接通过自动控制系统对机器进行调节,如纺纱工艺过程中梳棉机和并条机的自调匀整装置等。

用于纺织测试的仪器,大部分属于测量和计数两大类。虽然由测量仪器与计数仪器所得的结果都是数字,但这两种数字的意义却有本质上的不同,因此对这些不同数据应作不同的取舍。

所谓计数,意味着测量结果的不连续的分隔。它的每一个被计数字都是非常严格而确定的。也就是说,计数仪器上所反映的每位数字都是明确肯定的。

测量则是把被测对象与规定作为单位的同类量作比较的过程,测量结果以被测量与测量

单位的比值表示出来。所以测量仪器上所得到的数字,它的最后一位是估计出来的,是包含有误差的。这些测量数字的有效位数,要看所用仪器的精密程度而定。用作比较被测量的设备和装置,称为测量仪器。按给定准确程度复制出来的测量单位器件,称为量具。

测量基本方法可以分为两类:直接读数法和比较测量法。

当被测量直接由测量仪器指示出来,仪器的刻度就是被测量的值,这种方法称为直接读数法,如用电表测量电压、强力仪测量纤维强力等。

当被测量与标准量进行比较而决定其大小时,称为比较测量法,主要包括三种方法。

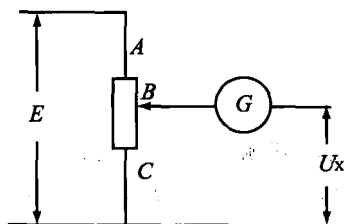


图 1-1 零位法测量原理

1. 零位法

在测量时,被测量对仪器的作用或效应由另一已知标准量的作用或效应平衡,使仪器指示为零值。图 1-1 所示为零位法测量电压的示意图。标准电源电压 E 加在电位器 AC 两端,电位器上滑臂位置的改变,可以改变 BC 两端的电压 U_{BC} 。当加入被测电压 U_x 时,移动电位器滑臂使 $U_{BC} = U_x$,则检流计 G 上读数为零,这时滑臂在电位器上所指出的数值,便是被测量 U_x

的大小。

零位法是一种较为精确的测量方法,其测量准确程度与零位检测器的灵敏度有关。检流计愈灵敏,测量结果误差愈小。天平称重时用砝码与物体重量比较,也属零位法。

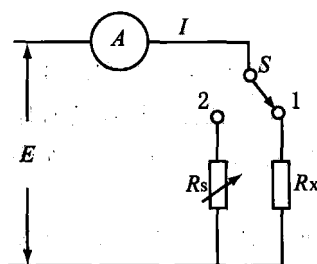


图 1-2 替代法测量原理

2. 替代法

用已知标准量代替被测量,使仪器指示值不发生改变,称为替代法。这时已知标准量的大小就等于被测量。图 1-2 是替代法测量电阻的示意图。 E 为电源电压, R_x 为被测电阻, R_s 是标准电阻,其阻值可连续调节。测量时先将开关 S 拨向 1,电路与 R_x 接通,电流表 A 上读得电流数为 I_1 。然后将开关 S 拨向 2,调节标准电阻 R_s 的阻值,使电流表 A 的读数与 I_1 相同,由此可得 $R_x = R_s$ 。

替代法测量电阻阻值时,测量结果的准确程度取决于标准电阻的准确程度,与电源电压是否准确无关。

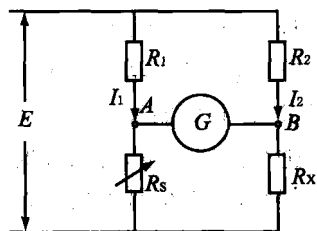


图 1-3 桥式法测量原理

3. 桥式法

图 1-3 所示为桥式法测量电阻的原理。 R_1 、 R_2 为固定阻值电阻, R_x 为被测电阻, R_s 为已知标准电阻, R_s 的阻值可以连续调节。测量时在电桥一臂放入被测电阻 R_x ,调节标准电阻阻值 R_s ,使电桥 A 点和 B 点的电位相等,电桥处于平衡状态,检流计 G 的读数为零。

电桥平衡时有如下关系:

$$I_1 R_s = I_2 R_x \quad (1-1)$$

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad (1-2)$$

式中: I_1 和 I_2 分别为流经电阻 R_1 、 R_s 和 R_2 、 R_x 的电流。

由以上两式可得

$$\frac{R_s}{R_1} = \frac{R_x}{R_2}$$

$$R_x = R_s \frac{R_2}{R_1} \quad (1-3)$$

若 $R_1 = R_2$, 则:

$$R_x = R_s$$

若 $R_2 = 10R_1$, 则:

$$R_x = 10R_s$$

若 $R_2 = 0.1R_1$, 则:

$$R_x = 0.1R_s$$

由此可见, 桥式法是零位法的一种特殊形式, 电阻测量范围可由 R_2 和 R_1 的比值决定。

实际测量中应用较多的是直接读数法, 因为它测量简单, 所需时间短。零位法化费时间较长, 但所得结果较为准确。

然而, 不论怎样的测量都只能做到一定的准确程度。随着科学技术的发展, 这种准确度会愈来愈高, 但测量结果仍不会完全是被测对象的真值, 只是真值的近似反映。测量结果的准确度通常用测量误差来表示。误差愈小, 测量就愈准确。如果能掌握那些不可避免的测量误差产生的原因及其规律, 就有可能加以改善而达到一定的测量准确性。

第二节 测量误差

上面已经提到, 任何一种测量总是有误差的, 即使采用最准确的仪器来进行测量, 所得结果永远不会是被测量的真值, 而只是它的近似值。测量误差是由各种各样的原因产生的, 要完全掌握并消除一切测量误差的来源是不可能的。此外, 经验告诉我们, 不同来源的误差在测量过程中出现的方式也是各不相同的。

测量值 x 减去真值 x_0 , 所得差值称为测量的绝对误差 Δx , 以下式来表示:

$$\Delta x = x - x_0 \quad (1-4)$$

要知道绝对误差的大小, 首先要求知道真值 x_0 , 而事实上真值 x_0 是不知道的。一般可以预先掌握仪器测量误差范围 Δx , 再由测量值 x 估计真值所在的区间。仪器的误差范围 Δx 大小, 是用量具或高一级准确度的仪器进行校核后得到的。

绝对误差不能用作误差大小的相对比较, 因而要有相对误差概念。相对误差 r 是绝对误差 Δx 与真值 x_0 的比值, 一般以百分率(%)表示, 其表示式为:

$$r = \frac{\Delta x}{x_0} \times 100$$

由于真值无法得到, 可以近似地以测量值 x 代替分母中的真值 x_0 , 对计算结果影响不大, 可得:

$$r = \frac{\Delta x}{x} \times 100 \quad (1-5)$$

测量误差按其来源可以分为以下几种:

(1)测量方法与仪器误差 仪器设计所依据的理论不完善,或假设条件与实际测量情况不一致所造成的误差,以及由于仪器结构不完善、仪器校正与安装不良所造成的误差。

(2)环境条件误差 测量环境条件变化,如温湿度改变、电磁场影响、外来机械振动、电源干扰等所产生的误差。环境温湿度变化还会引起试样本身物理机械性质的变化。

(3)人员操作误差 由于试验人员操作方法不规范所造成的误差,包括读数时的视差等。

(4)试样误差 纺织材料的被测对象总体是极大的,要测量出全部总体性质的真值是不可能的。由于总体中个体性质的离散性,取样方法不当、取样代表性不够和试验个体数不足等,都会产生试样误差。

由仪器结构上的原因,可能出现的误差有以下几种:

(1)零值误差 仪器零点未调好,测量结果在整个范围内其绝对误差为一常数,如图 1-4 所示。横坐标为被测量值,或称输入量。纵坐标为仪器指示值,或称输出量。 A 为理想情况下两者的关系, B 为存在零值误差时的情况。

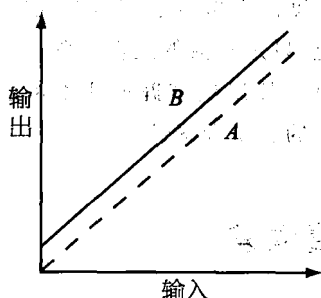


图 1-4 零值误差

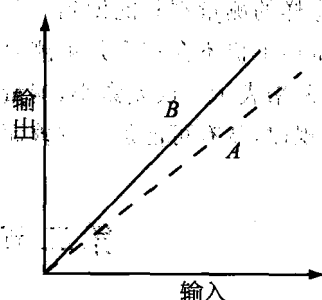


图 1-5 校准误差

(2)校准误差 仪器刻度未校准,指示结果系统偏大或偏小,相对误差为一常数,如图 1-5 所示, A 为理想情况下输出量与输入量之间的关系, B 为存在误差的情况。

(3)非线性误差 仪器输入量与输出量之间不符合直线转换关系,如图 1-6 所示, A 为理想线性转换关系, B 为存在非线性误差的情况。

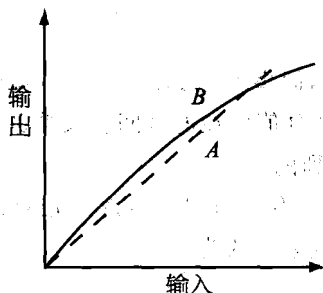


图 1-6 非线性误差

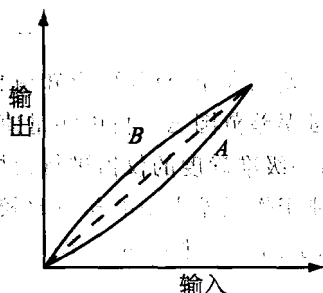


图 1-7 迟滞误差

(4)迟滞误差 仪器输入量由小到大和由大到小,在同一测量点仪器输出量的差异;或是仪器进程示值与回程示值之间的差异,简称进回程差。如图 1-7 所示, A 为进程曲线, B 为回

程曲线。

(5)示值变动性 对同一被测对象进行多次重复测量,其测量结果的不一致性。

此外,不同温度条件下仪器性能的变化以及在相同测量条件下仪器性能随时间的变化,也都会使测量结果产生误差。

以上各种误差尽管来源和表现形式有所不同,就其性质来说,可以分为三大类:

(1)系统误差 是在测量过程中保持恒定或遵循某种变化规律的误差,如前所说的仪器零值误差、校准误差等。

(2)随机误差 是对同一被测对象进行多次重复测量,测量结果不一致的误差。其特点是对每一次测量结果其误差出现的大小和正负都是随机的,但多次测量结果误差的分布仍符合一定的统计规律。进行多次重复测量取其平均,可减小随机误差,并可对能出现的误差范围进行估计。

(3)粗大误差 又称疏忽误差,是指明显地歪曲了试验结果的误差。测量过程中由于失误或异常试样所造成的误差,明显超出规定条件下预期的误差。测试结果出现异常值,偏离被测对象的正确数值甚大,需要根据一定的法则进行处理。

系统误差有其一定的规律性,可采用以下几种方法加以消除:

(1)校正值法 预先对系统误差进行研究,掌握系统误差的规律,以确定相应校正方法。如仪器刻度不准,可预先用量具或准确度较高一级的仪器进行校核,得出测量范围内各测量点的误差校正值。环境温度对测量对象的影响,可乘以温度修正系数消除。棉纤维的部分测试项目还可以用国际校准棉花标样或国家所颁发的标样进行测试校准,在测量结果中乘以修正系数。或用标准样品在仪器上测试,同时输入标准样品数据,利用仪器内部计算机进行软件校准。

(2)正负误差补偿法 进行两次测量,使系统误差在测量结果中出现一次为正值,一次为负值。取两次测量结果的平均,使结果与系统误差无关。

例如天平称量时,如果天平两臂的长度不完全相等,称物平衡时砝码质量与物体质量之间就有一定误差。若将物体和砝码左右盘交换放置,取两次读数的平均,使正负误差相消,就可得到物体的真实质量。

(3)替代法 将被测量 X 用已知标准量 A 置换,使置换后的仪器指示值或平衡状态保持不变,则有 $X=A$ 。

上例中若天平两臂的长度不等,可以采用替代法。先将质量为 P 的物体放在天平的右盘上,左盘放上质量为 m 的微细物体或砝码,使天平达到平衡。设天平左臂长度为 l_1 ,右臂长度为 l_2 ,则有:

$$ml_1 = Pl_2 \quad (1-6)$$

移去右盘中被称物体,放入质量为 Q 的砝码,使天平恢复原平衡状态,则有:

$$ml_1 = Ql_2 \quad (1-7)$$

由式(1-6)和式(1-7)可知, $P=Q$,与天平两臂长度是否相等无关,消除了天平不等臂误差。

第三节 仪器的静态和动态特性

一、仪器的静态特性

仪器的静态特性,是指被测量不变或作缓慢变化时,仪器所表现的特性。

描述仪器静态特性,有如下一些指标:

(1)测量范围 仪器在误差允许条件下的测量值范围。

(2)灵敏度 单位被测量变化所引起仪器读数的变化,称为仪器的灵敏度,以 S 表示。

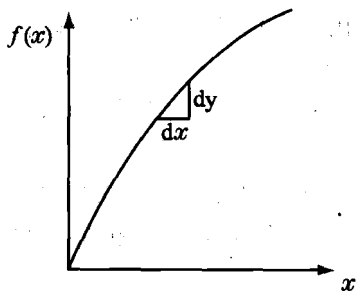
$$S = \frac{\Delta a}{\Delta A} \quad (1-8)$$

式中: Δa 为指针位移或仪器读数变化; ΔA 为被测量的变化。

例如天平称盘中加放 1mg 砝码所引起的指针偏移量,称为天平的灵敏度,单位为分度/mg。

有时用感量表示天平灵敏度,其数值为 S 的倒数,单位为 mg/分度,又称为天平的分度值。

$$\text{感量} = \frac{1}{S} = \frac{\Delta A}{\Delta a} \quad (1-9)$$



测试系统的输入量与输出量为线性关系时,灵敏度为一常数,等于转换直线的斜率。测试系统输入量与输出量为非线性关系时,如图 1-8 所示,灵敏度等于曲线在被测点的斜率。已知输入量与输出量的转换函数为 $f(x)$,则灵敏度 S 为:

$$S = \frac{dy}{dx} = \frac{d}{dx} f(x) \quad (1-10)$$

(3)准确度 仪器测量结果与被测对象真值之间的接近

程度,称为仪器的准确度。它是仪器系统误差与随机误差的综合反映,有时也称为精确度。仪器准确度用它的误差范围表示。

(4)精密度 仪器在规定条件下对被测量进行多次测量,所得结果之间的一致程度,称为精密度。它表示测量中随机误差的大小。仪器的精密度用它的示值变动误差表示。

(5)稳定性 在规定条件下,仪器保持其性能不变的特性,称为仪器的稳定性。通常,稳定性是对时间而言的,反映经过较长时间仪器性能的变化。

(6)可靠性 指仪器在规定条件和时间内,保持能完成规定功能的能力。仪器出现故障的机率愈小,可靠性愈高。仪器可靠性是由组成仪器各部件的故障率和使用寿命决定的。

二、仪器的动态特性

仪器的动态特性,是指仪器对快速变化的被测信号的响应能力。

例如用摆锤式强力仪进行纺织材料拉伸试验时,由于仪器的强力刻度标尺是在静力平衡条件下标定的,慢速拉伸试样时摆锤运动所产生的惯性误差可以忽略。在快速拉伸试验时,摆

锤加速运动产生的惯性误差会使强力指示值明显偏小,造成测量结果不准确。

一般的仪器或测试系统,可由图 1-9 所示的 3 个部分,即传感器、信号处理单元和指示记录装置组成。测试系统的动态特性,是它所组成部分的动态特性的总的表现。

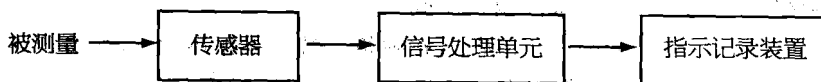


图 1-9 测试系统的组成

传感器是一种能量转换器,可以将一种被测物理量转换为其他形式的物理量,多数情况下转换为电量。常用传感器有电阻式传感器、电容式传感器、光电式传感器等。传感器的动态特性常用它的频率响应来表示。

信号处理单元,包括测量放大、信号变换电路等。电路中的电容、电感等具有记忆能力的元件参数,对测试系统的动态特性有很大影响。如电容式均匀度试验仪,加入电阻、电容所组成的低通滤波电路,可以消除纱条不匀信号中的高频成分,抑制短片段不匀,使记录的纱条不匀曲线明显地表示出纱条长片段不匀变化。

指示记录装置中各运动部件的质量和弹性,是决定指示和记录部分动态特性的重要因素。记录仪器种类很多,有笔式记录仪、光电振荡器、阴极射线示波器等,动态响应特性各不相同,使用者可根据被测对象的变化频率加以选择。

仪器或测试系统动态特性的测试方法有如下两种:

(1) 阶跃信号响应法 在仪器或测试系统输入端送入阶跃信号 $x(t)$, 该系统输出信号 $y(t)$ 随时间而变化的情况如图 1-10 所示。

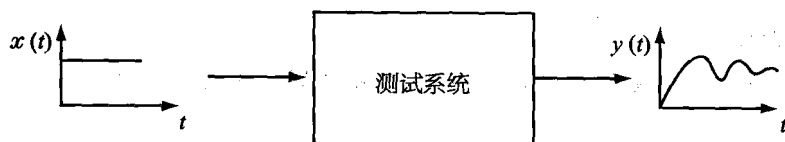


图 1-10 阶跃信号响应法测量系统的动态特性

理想测试系统输入端加上阶跃信号,其前沿快速上升,输出信号也是阶跃的。非理想测试系统由于存在惯性和阻尼,输出信号前沿以一定斜率上升,然后逐渐趋向稳定值。

(2) 频率响应法 在仪器或测试系统输入端加以振幅不变的正弦信号,当信号频率发生变化时,输出信号与输入信号振幅比的变化,如图 1-11 所示。

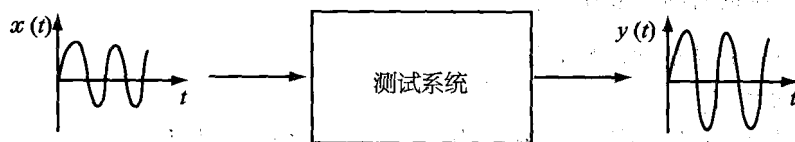


图 1-11 频率响应法测量系统的动态特性

若 X 是输入交变信号的振幅, Y 是输出交变信号的振幅,当输入信号频率变化时,理想测试系统输出信号与输入信号振幅比 Y/X 为一常数。一般测试系统往往只在某一段频率范围内输出信号与输入信号振幅比 Y/X 保持不变,输出信号与输入信号之间存在一定相移。因此,可以用输出信号与输入信号振幅比和频率的关系,即系统的幅频特性,以及输出信号与输

入信号之间的相移和频率的关系,即系统的相频特性,来表示测试系统的动态特性。

各种仪器或测试系统的阶跃响应特性和频率响应特性各不相同,可以根据其动态响应的特点划分为几种。

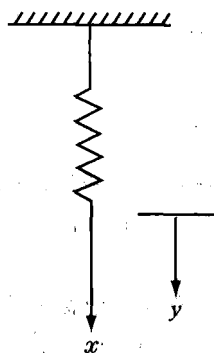


图 1-12 零阶测试系统

(一)零阶测试系统

如图 1-12 所示,在弹簧一端加以作用力 x ,弹簧产生伸长变形位移 y 。把作用力 x 看作系统输入量,弹簧位移 y 看作系统输出量,若忽略弹簧的运动惯性,则有:

$$y=kx \quad (1-11)$$

式中: k 为常数,与弹簧受力后的变形能力有关。

零阶测试系统的输出信号大小正比于输入信号,且与信号频率无关。在测量电路中,由电阻所组成的电路是零阶测试系统。

在零阶测试系统中,以 y 和 x 的比值 k 表示系统的特性,称为系统的灵敏度:

$$k=\frac{y}{x} \quad (1-12)$$

(二)一阶线性测试系统

由弹簧和阻尼器所组成的系统,如图 1-13 所示,系统的数学方程式为:

$$a \frac{dy}{dt} + by = cx \quad (1-13)$$

式中: a, b, c 为常数。

数学方程式为一阶常系数线性微分方程,该系统属一阶线性测试系统。

以上方程式经过变换,可以写成:

$$\frac{a}{b} \frac{dy}{dt} + y = \frac{c}{b} x \quad (1-14)$$

或

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = kx. \quad (1-15)$$

式中: $\tau = \frac{a}{b}$ 为系统的时间常数; $k = \frac{c}{b}$ 为系统的灵敏度。

一阶线性测试系统的动态响应如下。

1. 阶跃信号响应

若输入信号是单位阶跃信号,其振幅为 1。为归一化起见,设系统灵敏度 $k=1$,则一阶线性测试系统的微分方程解为:

$$y=1-e^{-t/\tau} \quad (1-16)$$

系统输出信号和时间关系为一指数曲线,如图 1-14 所示。由指数曲线特性可知,时间常数 τ 愈小,曲线达到最终稳定值所需时间愈短。

由式(1-16)可知,当 $t=\tau$ 时的输出信号为:

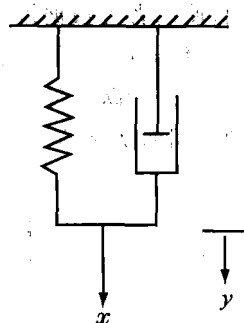


图 1-13 一阶线性测试系统

$$y = 1 - \frac{1}{e} = 0.63$$

因此,时间常数 τ 就是输出信号达到稳定值 0.63 倍所需的时间。

对式(1-16)求导数,可得:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{e^{-t/\tau}}{\tau} \quad (1-17)$$

当 $t=0$ 时,有:

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{t=0} = \frac{1}{\tau} \quad (1-18)$$

也就是说,如果从曲线起点作切线,与输出信号达稳定值的水平线相交交点所对应的时间,就是时间常数 τ 。

2. 频率响应特性

若一阶线性测试系统的输入信号为 $x = X \cos \omega t$, 其中 X 为输入信号的振幅, ω 为信号的角频率,一阶线性测试系统微分方程解为:

$$y = Y \cos(\omega t - \phi) \quad (1-19)$$

式中: $Y = \frac{kX}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}}$ 为输出信号振幅; $\phi = -\tan^{-1} \omega\tau$ 为输出信号与输入信号的相位移。

取 $k=1$ 进行归一化,输出信号振幅与输入信号振幅之比为:

$$\frac{Y}{X} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega\tau)^2}} \quad (1-20)$$

一阶线性系统的频率响应特性曲线如图 1-15 所示。上图为振幅频率响应曲线,下图为相位频率响应曲线。

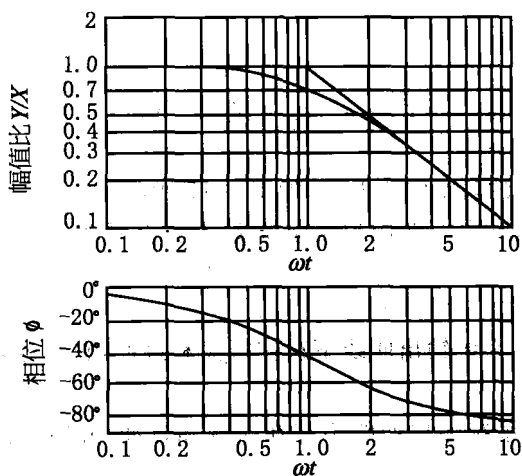


图 1-15 一阶线性系统的频率响应

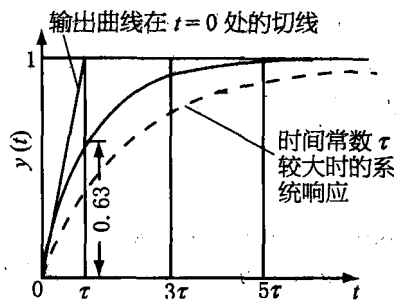


图 1-14 一阶线性系统的阶跃响应

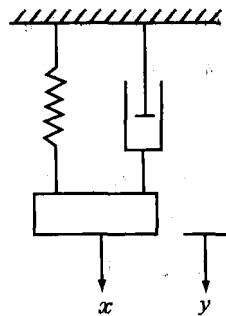


图 1-16 二阶线性测试系统

(三)二阶线性测试系统

由弹簧、阻尼器、质量等元件所组成的系统,称为二阶线性测试系统,如图1-16所示。系统的数学方程式为:

$$a \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{dy}{dt} + cy = ex \quad (1-21)$$

式中: a, b, c, e 均为常数。

该数学方程式为二阶常系数线性微分方程,系统称为二阶线性测试系统。方程式经过变换得:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{b}{a} \frac{dy}{dt} + \frac{c}{a} y = \frac{e}{a} x \quad (1-22)$$

写成标准形式的方程式为:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dy}{dt} + \omega_n^2 y = k'x \quad (1-23)$$

式中: $\omega_n = \sqrt{\frac{c}{a}}$ 为系统的固有振荡频率; $\zeta = \frac{b}{\sqrt{ac}}$ 为系统的阻尼比; $k' = \omega_n^2 k = \omega_n^2 \frac{e}{a}$ 为一常数。

1. 阶跃信号响应

当输入信号为单位阶跃信号和 $k=1$ 时,二阶线性系统微分方程式的解为:

当 $\zeta < 1$ 时

$$y = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n t + \phi) \quad (1-24)$$

式中: ω_n 为系统无阻尼自振频率; $\phi = \sin^{-1} \sqrt{1-\zeta^2}$ 。

当 $\zeta = 1$ 时

$$y = 1 - (1 + \omega_n t) e^{-\omega_n t} \quad (1-25)$$

当 $\zeta > 1$ 时

$$y = 1 - \frac{1}{2\sqrt{\zeta^2-1}} \left[(\zeta + \sqrt{\zeta^2-1}) e^{(-\zeta + \sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} - (\zeta - \sqrt{\zeta^2-1}) e^{(-\zeta - \sqrt{\zeta^2-1})\omega_n t} \right] \quad (1-26)$$

不同阻尼比 ζ 情况下二阶线性系统的阶跃响应曲线,如图 1-17 所示。

当 $\zeta < 1$, 系统为欠阻尼工作状态,输出信号为阻尼衰减振荡,其振荡频率为:

$$\omega_d = \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n \quad (1-27)$$

当 $\zeta = 1$, 系统为临界阻尼工作状态,系统输出曲线不存在振荡和过冲,它是过阻尼与欠阻尼工作状态的转折点。

当 $\zeta > 1$, 系统为过阻尼工作状态,系统输出曲线不存在振荡和过冲,并缓慢达到输出稳定值。

由此可见,阻尼比 ζ 的大小,直接影响输出信号到达稳定值的过程。 ζ 愈大,输出信号到达稳定值所需的时间愈长。但 ζ 过小时,输出信号会产生振荡和过冲。所以在设计二阶线性