

轧制工艺参数

测试技术

(第2版)

黎景全 主编

冶金工业出版社



轧制工艺参数测试技术

(第2版)

黎景全 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

北京
冶金工业出版社
2006

图书在版编目(CIP)数据

轧制工艺参数测试技术/黎景全主编. —2 版. —北京
冶金工业出版社, 1996 (2006.1 重印)

ISBN 7-5024-1813-X

I. 轧… II. 黎… III. 轧制-工艺-参数测试
IV. TG335

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 22227 号

出版人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 程志宏 美术编辑 王耀忠 责任印制 李玉山

北京市兴顺印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

1984 年 5 月第 1 版, 1996 年 5 月第 2 版, 2006 年 1 月第 6 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 12.25 印张; 291 千字; 187 页; 21401~22900 册

25.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010) 64044283 传真: (010) 64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号 (100711) 电话: (010) 65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价 (元)
钢管连轧理论	王先进 等编著	35.00
型钢孔型设计 (第2版)	赵松筠 等编著	29.00
中厚板生产	张景进 主编	29.00
冷轧带钢生产问答	赵家骏 等修订	45.00
型钢孔型设计	孔云祥 主编	30.00
轧制测试原理	喻廷信 主编	32.00
金属学原理	余永宁 编	56.00
常用有色金属资源开发与加工	董 英 等编著	88.00
现代铜盘管生产技术	李耀群 等编著	26.00
冷轧薄钢板生产 (第2版)	傅作宝 主编	20.00
高性能铜合金及其加工技术	刘 平 等著	29.00
特殊钢钢丝	徐效谦 等主编	59.00
矫直原理与矫直机械	崔 甫 著	42.00
轧钢过程自动化	丁修堃 主编	59.00
型钢生产知识问答	沈茂盛 等编著	29.00
有色金属压力加工	白星良 主编	29.00
金属压力加工理论基础	段小勇 主编	37.00
黑色金属压力加工实训	袁建路 等主编	23.00
轻金属冶金学	杨重愚 主编	39.80
陶瓷——金属复合材料	李荣久 主编	69.00
加热炉	戚翠芬 主编	26.00
连续铸钢	陈 雷 主编	25.00
金属塑性加工学——挤压、拉拔与管材冷轧	马怀宪 主编	35.00
现代材料表面技术科学	戴达煌 等编著	99.00
轧制工艺润滑原理技术与应用	孙建林 著	29.00
金属电磁凝固原理与技术	张伟强 著	20.00
多元渗硼技术及其应用	吉泽升 著	22.00
材料加工新技术与新工艺	谢建新 等编著	26.00
连续挤压技术及其应用	钟 毅 著	26.00

第二版前言

本书初版是于1984年出版的。本次再版基本上保持了原书的体系和深度，只是在具体内容上做了适当的删简、改写和增补。这次再版主要注重加强理论基础、贯彻少而精和理论联系实际的原则。修订时，我们参照了一些国内外大专院校的有关教材及科研院、所的有关学术论文和科研成果，并结合了我们多年来在教学、科研工作中的经验和体会，在此我们向对本书做出贡献的上述作者致谢。

本次再版由黎景全担任主编。参加修订再版工作的人员有北京科技大学黎景全（绪论、第一、二和四章），宋永龄（第三、五和六章）和东北大学于长生（第七、八和九章）。

本书稿完成后，曾邀请昆明工学院、鞍山钢铁学院等院校的授课教师进行过审稿。大家对修改稿进行了认真、细致地审议后，认为修订稿符合本课程教学大纲的要求，能满足教学的需要，可作为高等学校金属压力加工专业“测试技术”课程的教材。

编者向参加本书审稿并热情帮助和支持本书修订再版工作的有关人士致谢。

本书如在修订后还有不足之处，恳切希望广大读者继续提出宝贵意见，以便进一步修改完善。

编 者

1995年11月于北京

前 言

本书系根据一九八二年冶金高等院校教材工作会议制订的教材规划编写的，作为金属压力加工专业测试技术课的教学用书，也可供其它有关专业师生以及从事测试技术工作的工程技术人员和科学研究人员参考。

本书是参照了一些国内外的有关资料，以及我们在教学和科学研究实践中的粗浅体会编写的，目的在于使学生掌握有关测试技术的基本理论和方法，并通过实际操作培养学生具有一定的实验技能。

本书由北京钢铁学院黎景全主编。参加编写工作的有北京钢铁学院吴特昌（编写第一章、第二章及第三章的第二节和第五章），宋永龄（编写第四章、第七章和第八章）；东北工学院于长生（编写第九章和第十章）；黎景全（编写绪论、第三章的第一节和第六章）。

本书经东北重型机械学院张云骏同志审阅。在审稿会上，东北重型机械学院、武汉钢铁学院、西安冶金建筑学院、江西冶金学院和昆明工学院等单位的有关教师，对初稿提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，经验不足，加之时间仓促，书中错误和不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

一九八三年五月

目 录

绪论	(1)
第一章 测量系统及其主要特性	(5)
第一节 测量系统	(5)
第二节 测量系统的基本特性	(7)
第二章 电阻应变片及其测量电路	(17)
第一节 电阻应变片	(17)
第二节 电桥电路	(31)
第三章 测量装置	(44)
第一节 电阻应变仪	(44)
第二节 记录仪器	(58)
第四章 力参数测量	(71)
第一节 零件的应力应变测量	(71)
第二节 轧制力测量及传感器设计	(84)
第三节 传动轴的扭矩测量	(104)
第四节 轧件张力测量	(113)
第五节 轧制单位压力和摩擦力的测量	(116)
第六节 挤压力测量	(121)
第七节 拉拔力测量	(121)
第五章 电参数测量	(122)
第一节 直流电机电参数测量	(122)
第二节 交流电机电参数测量	(125)
第六章 运动参数测量	(130)
第一节 位移测量	(130)
第二节 转速测量	(135)
第三节 转速降测量	(138)
第七章 轧件尺寸测量	(141)
第一节 宽度测量	(141)
第二节 厚度测量	(142)
第三节 辊缝测量	(151)
第四节 刚度测量	(154)
第八章 温度测量	(157)
第一节 温度和温度仪表	(157)
第二节 辐射测温原理	(159)
第三节 辐射式温度计	(162)
第四节 辐射测温技术	(169)

第九章 测量误差分析与实验数据处理.....	(171)
第一节 误差的基本概念.....	(171)
第二节 随机误差.....	(174)
第三节 系统误差.....	(177)
第四节 过失误差与可疑数值的舍弃.....	(180)
第五节 实验数据表示法.....	(180)
参考文献.....	(186)

绪 论

一、测试技术的基本概念

测试技术包括测量和试验的全部过程,即对物理量或参量的感受、变换、传输、显示、记录和处理等。它是实验科学的一部分,主要研究各种物理量或参量的测量原理和测量方法。

随着科学技术的发展,在工农业生产实践和科学研究中日益广泛地应用各种测试技术来研究和揭示生产过程中发生的物理现象。测试技术是从十九世纪末和二十世纪初发展起来的一门新技术,迄今已发展成为一个领域相当宽广的学科,在冶金、机械、建筑、航空、桥梁、化工、石油、农机、造船、水利、原子能,甚至地震预报、地质勘探、医学等方面也采用了测试技术。

近年来,由于电子技术的发展,特别是仪表和电子计算机技术的迅速发展,大大促进了测试技术的发展。过去是依靠人工操作、调节、记录、处理和计算的部分,现在已用计算机的硬件和软件完成。当前测试技术正向着数字化、自动化、智能化、集成化的方向发展。由于信号的数字处理技术日臻完善,数字测量将大量地取代模拟测量。微处理器在测试技术中的应用,推动着测试手段的智能化、自动化,即把传统的测量仪器变成了智能仪器。它利用微处理器的逻辑功能和控制功能进行自动测量、自动调节、自诊故障。它利用微处理器的数据处理功能进行误差校正、数据变换和实验曲线拟合。当前的计算机辅助测试(CAT)大大提高了测量精度和试验工作效率。

二、测试方法的分类

目前所用的测试方法很多,难以确切分类。根据测试方法的物理原理,大致可分为机械测量法、电测法、光测法、声测法等。

机械测量法是利用机械器具对被测物理量进行直接测量。如用杠杆应变计测量应变,用机械式测振仪测量振动参量等。

电测法是先将被测物理量转换成电量,再用电测仪表进行测量的方法。如用电阻应变仪测量应力应变,用热电高温计测量温度等。

光测法是利用光学的基本理论,用实验的方法去研究物体中的应力、应变和位移等力学问题。如光弹法、云纹法。

声测法是利用声波或超声波在介质中的传播速度和波形衰减情况来估价被测物的质量。如用声波检查混凝土的质量(抗压强度和内部缺陷)等。

在上述的测试方法中,目前应用最广的是电测法,因为它具有以下特点:

(1) 灵敏度高 用应变片和应变仪目前可测到5个微应变(5×10^{-6})甚至可以精确到1个微应变。

(2) 精度高 在一般条件下,常温静态应变测量可达到1%的测量精度。

(3) 尺寸小、重量轻 基长最短者达0.3mm,基宽最窄达1.4mm,中等尺寸的应变片为0.1~0.2g。对于测量的试件来说,可以认为它没有惯性,故把它粘贴在试件表面上之后,不影响试件的工作状态和应力分布。

(4) 频率响应快 由于应变片的重量很轻,在测量运动件时,其本身的机械惯性可以忽略,故可认为对应变的反应是立刻的。可测量的应变频率范围很广,从静态到数十万赫的动态应变乃至冲击应变。

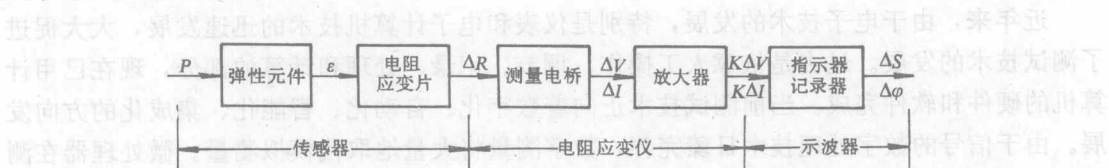
(5) 测量范围广 不仅能测量应变,而且能测量力、位移、速度等。不仅能测量静止的零件,而且也能测量旋转件和运动件。

(6) 能多点、远距离、连续测量和记录 它易于实现测试过程的自动化、数字化和遥测。

(7) 可以将不同的被测参数转换成相同的电量,因而可以使用相同的测量仪器和记录仪器。

三、电测法的基本原理和电测装置的组成

非电量电测法是利用一些物理现象将被测量的非电量转换成电量,再经过电子仪器放大、记录(显示),得到与非电量成比例的曲线,经过标定即可得到非电量的大小。现以测力为例,说明其转换过程如下:



电测装置的组成为:

(1) 传感器 它的作用是将感受到的非电量转换成电量,以便进一步放大、记录或显示。实现这种转换作用的装置叫做传感器。它由两部分组成:一部分是直接承受非电量作用的机械零件或专门设计的弹性元件;另一部分是敏感元件(例如,电阻应变片等)。

(2) 电阻应变仪 它的作用是将传感器输出的微弱信号进行放大,并以电压或电流形式输出,以推动指示器或记录器工作。例如, YJ-25 型静态电阻应变仪、YD-21 型动态电阻应变仪等。

(3) 记录器或指示器 它的作用是记录和显示被测信号,供进一步分析和数据处理之用。它可以是一般的电气仪表,也可以是记录仪、光线示波器、磁带记录器等。

四、测试技术在轧钢生产中的作用

在轧钢生产中,多数设备是在重载、高温、多尘等恶劣环境下工作的,设备的技术性能和运转状况对生产过程和产品质量有着重要的影响。因此,在保证设备高效能和正常运转的条件下,如何安排生产工艺规程,以便达到高产、优质、低耗是现代轧钢生产急待解决的课题。诚然,计算轧制工艺参数有许多理论公式和半经验公式,但这些公式都是在一定条件下推导出来的,必然带有一定的局限性。鉴于目前轧制理论的发展水平,尚不能精确地解决在各种具体生产条件下的工艺参数的计算问题。因此,比较可靠的办法还是对轧制工艺参数进行直接测定,以取得在不同生产工艺条件下的实测数据作为编制生产工艺规程的依据。可见,测试技术对轧钢生产和科学研究有以下几方面的作用:

(1) 利用现代的测试手段,研究和鉴别生产过程中发生的各种物理现象,对现有工艺、设备、产品质量等进行剖析,以求明确进一步改进方向和改进方案。

(2) 摸清现有设备的负荷水平,在保证设备安全运转条件下,充分发挥现有设备潜力,

扩大品种,以达到高产、优质、低耗之目的。

(3) 通过大量的测试研究,得出相应的计算公式(如轧制力、力矩的计算公式等)。

(4) 通过对测试结果的综合分析,可为科研人员验证现有理论和建立新理论、设计人员确定最佳设计、工艺人员拟定最佳工艺规程等提供科学依据。

(5) 通过测定现有设备或新设备主要部件的受力状态、运动规律等,从而判断该设备的性能是否符合设计要求。

(6) 在轧钢生产的自动控制系统中,也需要对力能参数进行检测,作为系统的反馈信号对生产过程进行自动调节和控制。

总之,没有现代化的测试技术,要发展轧钢生产是困难的,甚至是不可能的。实践证明,生产技术的发展是和测试技术的发展息息相关,互相渗透,互相促进。因为生产发展推动了测试技术的发展,反过来,测试技术的发展又促进了生产技术的不断提高。因此,测试技术水平在一定程度上也标志着生产和科学技术的发展水平。

五、课程内容

工程技术所要测量的各种参量可分为物理量、化工量等。而物理量又可分为电量和非电量两大类。

物理量	{	电量: 电流、电压、电功率等	
		非电量 {	机械量: 力、力矩、位移、速度、应变等
		热工量: 温度、流量、压力等	

化工量: 浓度、酸碱度等。

由于教学课时的限制,本课程主要侧重于和轧制有关的非电量电测技术,包括测量原理、测量方法、测量仪器以及数据处理等。

轧钢生产中经常测量的参数有:

- (1) 力参数: 力、应力、轧制力、力矩、张力等。
- (2) 工艺参数: 温度、宽度、厚度、压下量等。
- (3) 电参数: 电流、电压、功率等。
- (4) 运动参数: 位移、速度、加速度、转角等。

从测量方法来看,上述这些参数中,除了几何参数采用直接测量外,其它各种参数的测量广泛采用非电量电测法和电量(电流、电压、功率等)电测法。

六、设置本课程的目的和任务

本课程的目的是使学生通过测试技术的基础理论学习和实验,初步掌握以非电量电测法为主要内容的轧制参数测试方法和技能,为以后的生产实践和科学研究打下必要的基础。通过本课程的学习,要求达到:

- (1) 根据科学研究或生产实际需要能提出合理的测试方案;
- (2) 根据被测对象的性质、环境特点和对测量精度的要求,对传感器和测量系统能够进行合理的选择;
- (3) 初步掌握传感器的标定和常用仪器的操作技术;
- (4) 学会对试验数据进行处理的基本方法。

七、学习方法

鉴于本课程的特点,在学习方法上应处理好以下几个关系:

(1) 本课程和其它课程的关系 本课程是一门综合性的边缘科学,除与专业课关系密切外,还涉及到基础课和技术基础课方面的知识。因此,在学习过程中,要把本课程的内容与学过的基础理论结合起来。

(2) 本课程与实际操作的关系 本课程是一门实践性很强的应用科学,必须与实验课密切配合,只有理论与实践相结合,才能在理论上掌握测试原理和方法,在实践上掌握测试技能,做到学以致用。

(3) 测试技术与测量仪器的关系 测试技术与测量仪器是密切相关的,不可分割的,但又有一定的侧重和分工。本课程侧重于测试原理和方法,而把测量仪器当作工具,学会正确使用,尽量减少测量误差,提高测量精度。

本课程主要介绍测量仪器的基本原理、结构、性能、使用、维护、修理、校准、检定、验收、包装、运输、贮存、报废等各个环节,使学生掌握测量仪器的基本知识和基本技能,并能根据被测对象的特点,选择合适的测量仪器,进行测量。

本课程主要介绍测量仪器的基本原理、结构、性能、使用、维护、修理、校准、检定、验收、包装、运输、贮存、报废等各个环节,使学生掌握测量仪器的基本知识和基本技能,并能根据被测对象的特点,选择合适的测量仪器,进行测量。

本课程主要介绍测量仪器的基本原理、结构、性能、使用、维护、修理、校准、检定、验收、包装、运输、贮存、报废等各个环节,使学生掌握测量仪器的基本知识和基本技能,并能根据被测对象的特点,选择合适的测量仪器,进行测量。

本课程主要介绍测量仪器的基本原理、结构、性能、使用、维护、修理、校准、检定、验收、包装、运输、贮存、报废等各个环节,使学生掌握测量仪器的基本知识和基本技能,并能根据被测对象的特点,选择合适的测量仪器,进行测量。

本课程主要介绍测量仪器的基本原理、结构、性能、使用、维护、修理、校准、检定、验收、包装、运输、贮存、报废等各个环节,使学生掌握测量仪器的基本知识和基本技能,并能根据被测对象的特点,选择合适的测量仪器,进行测量。

本课程主要介绍测量仪器的基本原理、结构、性能、使用、维护、修理、校准、检定、验收、包装、运输、贮存、报废等各个环节,使学生掌握测量仪器的基本知识和基本技能,并能根据被测对象的特点,选择合适的测量仪器,进行测量。

本课程主要介绍测量仪器的基本原理、结构、性能、使用、维护、修理、校准、检定、验收、包装、运输、贮存、报废等各个环节,使学生掌握测量仪器的基本知识和基本技能,并能根据被测对象的特点,选择合适的测量仪器,进行测量。

本课程主要介绍测量仪器的基本原理、结构、性能、使用、维护、修理、校准、检定、验收、包装、运输、贮存、报废等各个环节,使学生掌握测量仪器的基本知识和基本技能,并能根据被测对象的特点,选择合适的测量仪器,进行测量。

本课程主要介绍测量仪器的基本原理、结构、性能、使用、维护、修理、校准、检定、验收、包装、运输、贮存、报废等各个环节,使学生掌握测量仪器的基本知识和基本技能,并能根据被测对象的特点,选择合适的测量仪器,进行测量。

第一章 测量系统及其主要特性

第一节 测量系统

一、测量系统的组成

测量系统是指为完成一定测量任务而使用的测量仪器、设备的组合。一个完整的测量系统，包括信息的检测、转换、放大、显示（记录）和处理等几大部分。具体地说，它通常由传感器、测量电路、显示（记录）仪器或数据处理仪器等三大部分组成，如图 1-1 所示。

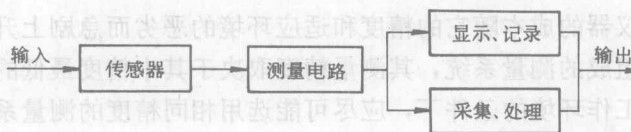


图 1-1 测量系统的组成

（一）传感器

传感器的作用是将感受到的物理量（非电量）按一定的函数关系（一般是线性关系）转换为电量，以便进一步放大、记录（显示）。实现从非电量到电量的转换装置叫做传感器。它主要由弹性元件（敏感元件）和变换元件两部分组成。

弹性元件是一个直接与被测介质接触、专门设计的元件或机械零件，它的作用是直接感受被测的物理量，并将其变为另一种形式的物理量。例如，测量轧制力用的电阻应变式传感器，其中的应变筒就是弹性元件，它把轧制力转换成应变。

变换元件的作用是将弹性元件转换成的物理量变换为相应的电量。例如，上述应变筒上粘贴的应变片就是变换元件，它把应变筒应变的变化变换为电阻的变化。有些传感器的弹性元件与变换元件同为一体，例如，热电偶既是敏感元件（直接感受温度），又是变换元件（将温度变为电势）。

（二）测量电路

测量电路通常包括测量电桥、调制、放大、解调、微分、积分、模/数或数/模转换等电路。其作用是把传感器输出的微弱电信号变换为易于测量的电压或电流，以便推动显示（记录）器工作。

（三）显示（记录）器

显示器的作用是将测量电路输出的随时间变化的电信号，以模拟曲线或数字的形式显示（记录）测量结果，供下一步分析和数据处理之用。数据显示可以用指针式电表、电子示波器和显示屏等来实现。而数据记录则可采用各种笔式记录仪、光线示波器或磁带记录仪等来实现。

（四）数据采集、处理仪器

由于微电子和计算技术的发展，可应用电子计算机及带有微处理机的数据处理仪器自动地对试验数据进行采集和分析处理，并以人工处理无法比拟的速度直接给出高精度的试

验结果,节省了大量时间。电子计算机应用于测量系统使测试技术产生了飞跃性的发展,成为测量系统发展的重要方向。

二、对测量系统的基本要求

对测量系统的基本要求有以下几点。

1. 灵敏度高 测量系统应具有较高的灵敏度,惯性小,响应速度快,能及时地反映出被测物理量的瞬变过程;

2. 线性好 测量系统的各个环节要在线性状态下工作,输出与输入之间成比例关系;

3. 稳定性好,抗干扰能力强 测量系统应具有良好的工作稳定性和抗干扰能力,内部噪声小,不从外部引进噪声;

4. 精度高。

需要指出的是,在选择测量系统时,必须根据测量目的和要求,尽量做到技术上合理,经济上节约。因为仪器的成本随它的精度和适应环境的恶劣而急剧上升。此外,误差理论指出,由若干仪器组成的测量系统,其测量精度取决于其中精度最低的环节。因此,在满足一定测量精度和工作环境的条件下,应尽可能选用相同精度的测量系统,而不应盲目地追求某些仪器的高性能指标。

三、测量系统的分类

根据测量系统的输出方式,可将测量系统分为模拟测量和数字测量两大类。

(一) 模拟测量系统

通常被测量的物理量都是随时间连续变化的量(称为模拟量),这些物理量经过测量系统的各种变换和处理之后,输出连续变化的电量(如电压量或电流量)转换成指针的位移或记录曲线等,这种测量系统叫做模拟测量系统。

模拟测量系统主要由传感器、测量放大器和波形记录仪等组成(图 1-2),该系统由电源供给直流电或交流电。



图 1-2 模拟测量系统框图

模拟测量系统的主要优点是价格便宜,形象直观,灵活简便。它的主要缺点是精度低。

(二) 数字测量系统

在数字测量系统中,首先要将随时间连续变化的量变换成离散量,即把连续量在数值上离散化,在时间上也离散化。这种在数值上和时间上都离散化的量称为数字量。通过测量系统把所测得的模拟量变换为数字量,然后再进行数字显示、记录或进一步处理,如图 1-3 所示。

被测的物理量经传感器转换成电压信号,在数据放大器中放大,经采样保持器和模/数转换器将模拟电压转换成数字量,后者经计算机的接口电路输入计算机。数字测量系统的整个过程是在计算机的中央处理器控制下进行的。

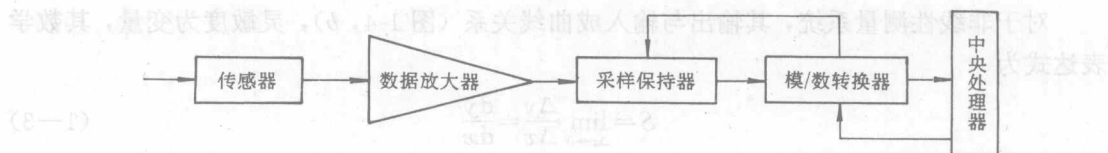


图 1-3 单通道数字测量系统框图

数字测量系统的主要优点是具有很高的测量精度，能够排除人为的读数误差，所测得的数据是数字量，可以直接输入计算机进行运算和处理，以实现数据处理的自动化。

第二节 测量系统的基本特性

所谓测量系统特性是指测量系统对其输入（量）的影响，通常用测量系统的输出（量）与输入（量）之间的关系式来描述。所谓输入（量）是指被测物理量的统称，如压力、温度、速度等。而经过测量系统变换后的量（指示值或记录）称为输出或响应。

测量系统的输出能否精确地反映出被测的物理量，是由测量系统的特性所决定的，因此只有正确地选用测量系统才能使其输出准确地反映输入，为此必须掌握测量系统特性。下面仅介绍模拟测量系统（以下简称为测量系统）特性——静态特性与动态特性。

一、静态特性

当输入信号不随时间变化（或变化极其缓慢）时，称测量系统的输出与输入之间的关系为测量系统的静态特性。通常以灵敏度、线性度和滞后等参数表示。

（一）灵敏度

在静态或稳态的条件下，输出量的增量与输入量的增量的比值称为灵敏度，以 S 表示，即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (1-1)$$

式中 Δy ——输出量的增量；

Δx ——输入量的增量。

对于线性测量系统，其输出与输入成直线关系（图 1-4, a），灵敏度为常数，其表达式为

$$S = \frac{y}{x} \quad (1-2)$$

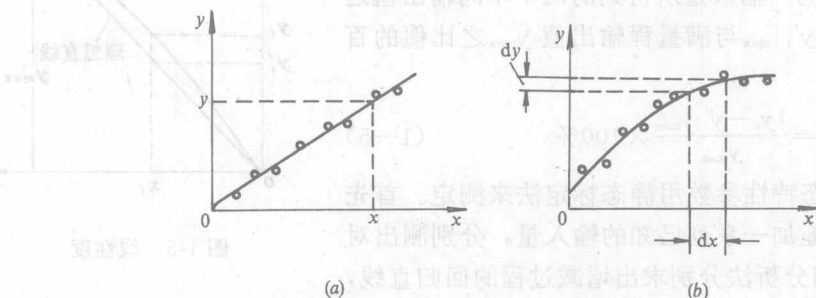


图 1-4 灵敏度

(a) 线性测量系统的灵敏度；(b) 非线性测量系统的灵敏度

对于非线性测量系统，其输出与输入成曲线关系（图 1-4, b），灵敏度为变量，其数学表达式为

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (1-3)$$

式中 dy ——输出增量；

dx ——输入增量。

当测量系统的输出与输入的量纲相同时，则该系统的“灵敏度”常称为“放大倍数”。或“增益”。当输出的量纲与输入的量纲不相同，则该系统的灵敏度量纲可用下式表示

$$\text{灵敏度的量纲} = \frac{\text{输出量纲}}{\text{输入量纲}}$$

在选择测量系统的灵敏度时，要注意其合理性。一般说来，灵敏度以高为好。但是灵敏度越高，量程越小，稳定性也越差。

测定灵敏度的方法称为标定（或校准）。常以标准量作为输入，并测出相对应的输出。再根据输入数据 x_i 与输出数据 y_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$)，便可在直角坐标图上描绘出曲线，该曲线称为静态标定曲线。曲线上各点的斜率就是各点的灵敏度。

(二) 线性度

实际标定曲线与理想直线的偏离程度叫做线性度或非线性误差，以 L 表示。通常用标定曲线和理想直线之间最大偏差 $|y_i - y'_i|_{\max}$ 与满量程输出值 $y_{\max}$ 之比值的百分数表示（图 1-5）。

$$L = \frac{|y_i - y'_i|_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1-4)$$

测量系统的标定曲线可以通过静态标定来求得，而理想直线的确定尚无统一的标准，一般可采用下述二种方法：

一是作图法，即在已测得的标定曲线图上，把零输出点（图 1-5 中的 o 点）与满量程输出点（图 1-5 中的 b 点）连接起来的直线（图 1-5 中的 ob 线）作为理想直线。这种方法精度不高，但由于简单、方便而常被采用。二是最小二乘法（见第九章）。

(三) 滞后

在相同的测量条件下，当输入量由小增大，而后再由大减小时，所得到输出量的不一致程度称为滞后（图 1-6），以 H 表示。滞后是以同一输入量所得到的两个不同输出值之间的最大差值 $|y_i - y'_i|_{\max}$ 与满量程输出值 $y_{\max}$ 之比值的百分数表示

$$H = \frac{|y_i - y'_i|_{\max}}{y_{\max}} \times 100\% \quad (1-5)$$

测量系统的静态特性参数用静态标定法来测定。首先对所用的测量系统施加一系列已知的输入量，分别测出对应的输出量；用回归分析法分别求出增减过程的回归直线，根据前述方法求出灵敏度、线性度、滞后等参数。对于测量系统来说，希望线性度和滞后越小越好。若测量系统的静态特性不符合测试要求，则应找出根源所在，设法消除，直至更换。

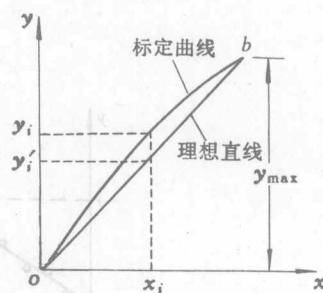


图 1-5 线性度

二、动态特性

在工程测量和科学试验中，经常要测量迅速变化的物理量。测量系统能否准确地反映这些变化的物理量，取决于该系统的动态特性——快速响应的能力，为此必须研究测量系统的动态特性。所谓测量系统的动态特性是指系统对于随时间变化的输入量的响应特性，即当输入量随时间变化时，测量系统的输出与输入之间的关系。一个测量系统的输出量随时间变化的规律（变化曲线）不能同时再现输入量的时间变化规律（变化曲线）时，则会产生误差，这个误差称为动态误差。动态误差大小反映动态特性的好坏。因此，研究测量系统动态特性的目的，就是研究动态

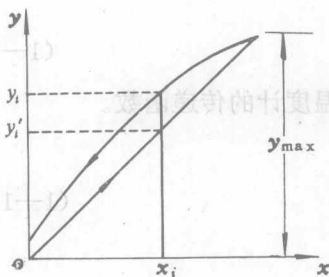


图 1-6 滞后

输出与输入之间的差异。研究方法是通过对系统的阶跃响应和频率响应来表示测量系统的动态特性。研究工具是用微分方程和传递函数来描述。

（一）测量系统的传递函数

传递函数定义为输出信号对输入信号之比。传递函数就是测量系统的数学模型，它以反映输出与输入关系的微分方程式表示。由于测量系统一般都是线性系统，所以传递函数多是线性常微分方程式。

传递函数是一阶微分方程式的称为一阶测量系统；是二阶微分方程式的称为二阶测量系统。我们常用的测量系统一般为一阶和二阶测量系统。

1. 一阶测量系统的传递函数

属于典型的一阶测量系统有液柱式温度计和简单的 RC 滤波电路等。现以液柱式温度计测量温度为例（图 1-7），说明用微分方程建立数学模型的方法，进而导出一阶测量系统传递函数的一般形式。

设 $T_i(t)$ 表示温度计的输入信号，即温度计温包周围被测流体的温度（被测温度），也可以写成 $x(t)$ ； $T_o(t)$ 表示温度计的输出信号，即温度计中液柱的位移（指示温度），或写成 $y(t)$ ； C 表示温度计温包（包括其内液柱介质）的热容量； R 表示温度从热源传给温包的液体其间传导介质的热阻。根据热力学平衡方程，可得

$$\frac{T_i(t) - T_o(t)}{R} = C \frac{dT_o(t)}{dt} \quad (1-6)$$

则

$$RC \frac{dT_o(t)}{dt} + T_o(t) = T_i(t) \quad (1-7)$$

令 $\tau = RC$ ，则得下式

$$\tau \frac{dT_o(t)}{dt} + T_o(t) = T_i(t) \quad (1-8)$$

这就是液柱式温度计的数学模型，它是一阶线性微分方程。

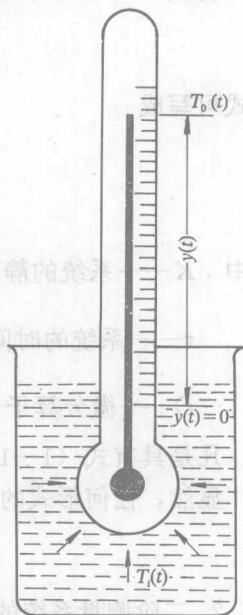


图 1-7 液柱式温度计