



“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系系列精品教材
普通高等教育“十五”国家级规划教材



The Measurement Technique of
Thermal Energy and
Power Engineering

热能与动力工程测试技术

第③版

俞小莉 严兆大 © 主编

双色印刷



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材
普通高等教育“十五”国家级规划教材

热能与动力工程测试技术

第3版

主编 俞小莉 严兆大
参编 黄瑞 吴锋 刘震涛



机械工业出版社

本书介绍了热能与动力工程领域中主要参数的测量理论与技术。全书共 12 章,第 1~3 章主要介绍测试技术相关的基础知识,包括基本概念辨析、性能参数表达,以及误差分析处理方法介绍等;第 4~12 章介绍热能与动力工程领域重要参数测量技术,包括温度、力与压力、流速、流量、液位、转速、转矩、功率、有害排放物质和振动噪声等参数的测量技术。

本书为能源与动力工程专业本科生教材和研究生参考书,也可供该领域从事试验研究与生产检验等工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热能与动力工程测试技术/俞小莉,严兆大主编. —3 版. —北京:机械工业出版社,2017.11

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系列精品教材
普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-58644-9

I. ①热… II. ①俞… ②严… III. ①热能-测试技术-高等学校-教材
②动力工程-测试技术-高等学校-教材 IV. ①TK

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 300403 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:蔡开颖 责任编辑:蔡开颖 王海霞 任正一

责任校对:郑 婕 封面设计:张 静

责任印制:张 博

唐山三艺印务有限公司印刷

2018 年 5 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·15 印张·362 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-58644-9

定价:39.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版



俞小莉 1963年出生，先后获浙江大学内燃机专业学士、硕士和博士学位，现为浙江大学能源工程学院教授、博士生导师。现任中国内燃机学会常务理事、编辑

委员会委员，中国机械工业教育协会能源与动力工程学科教学委员会动力机械工程分委员会副主任，浙江省内燃机学会和浙江省汽车工程学会理事长，浙江省科技发展咨询委员会委员等职务。享受国家特殊津贴。主要研究方向为动力机械工程和车辆工程学科领域热机耦合可靠性设计理论与试验方法、多能源系统热管理理论与技术。发表学术论文150余篇，获得国家科技进步二等奖、国防科技进步二等奖和三等奖各1项，被授予全国优秀科技工作者等荣誉称号。



严兆大 浙江大学教授、博士生导师。1960年毕业于交通大学内燃机专业，1962年清华大学工程力学系研究生毕业。1985~1987年及1993~1994年作为高级访问

学者在加拿大和美国的大学里从事代用燃料及辐射传热研究。历任浙江大学内燃机研究所所长、全国动力机械类教学指导委员会委员、内燃机燃烧学国家重点实验室学术委员、浙江省内燃机学会理事长等职。享受国家特殊津贴。主要研究方向为内燃机燃烧数值模拟、热负荷及热强度研究。已出版《风冷内燃机》《内燃机测试技术》《热能与动力机械测试技术》《汽车工程手册》《内燃机工程师手册》等7本著作，国内外发表学术论文100余篇。



**The Measurement Technique of
Thermal Energy and
Power Engineering**

第3版前言

本书为“十三五”国家重点出版物出版规划项目。

本书的第1版、第2版先后于1999年和2005年出版，均由浙江大学严兆大教授主编、机械工业出版社出版，陆续在全国几十所高校作为教材使用。鉴于学科的发展和技术的进步，在广泛征求教材使用高校意见的基础上，于2014年开始对本书第2版进行修订，形成了本版本（第3版）。

与第2版相比，本书不仅对章节数量做了调整，而且对部分章节内容做了重新编排和更新。在章节安排方面，从原来的13章调整为12章，主要是缩减了“传感器的基本类型及其工作原理”这一章，把相关核心内容融入了各参数测量技术的章节中，减少了内容上的重复。本书每一章都有内容编排变化和更新，其中改变较多的章节主要是第2、3、4、5、9、11章。

本书由浙江大学俞小莉、严兆大教授主编。第1章由严兆大编写，第2、3、6、7章由俞小莉编写，第4、8、9章由黄瑞编写，第5、10章由吴锋编写，第11、12章由刘震涛编写。

本书的编写参考了许多已经出版的教材和文献资料，衷心感谢所有作者，列举不尽之处敬请谅解。

由于编者水平有限，书中疏漏和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编者

第2版前言

本书第1版于1999年出版，至今已第6次印刷。根据教高司[2002]114号关于“十五”国家级规划教材出版任务的通知，《热能与动力机械测试技术》列入“十五”国家级规划教材（修订）计划，并改名为《热能与动力工程测试技术》，仍由机械工业出版社出版。

本书自1999年出版以来已有十余所院校在教学中使用。为了做好修订工作，我们广泛征求了这些院校的意见。本次修订全书仍保留十三章，但内容均有增减。主要增加了该领域中现代测试技术新的进展，同时内容有所拓宽，每章还增加了思考题与习题，更适合热能与动力工程大专业的教学，书中有*号的章节为自学内容。

本书由严兆大教授主编，其中第一、二、三、十二章由严兆大编写，第四、五、六、十章由吴锋编写，第七、八、九、十一、十三章由俞小莉编写。全书由江苏大学高宗英教授主审。

本次修订参考了近年来兄弟院校出版的教材，同时大连理工大学、山东大学、合肥工业大学等院校任课教师也对本书的修订提出了许多宝贵意见，特此一并致谢。

由于编者学识有限，书中的缺点和错误难免，恳请读者指正。

编者

第1版前言

1996年11月第二届全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会第一次会议，希望加快教改步伐、加强基础、淡化专业、拓宽学生的知识面，尽快过渡到口径更宽的“热能工程与动力机械”专业。会议确定《热能与动力机械测试技术》由浙江大学内燃机研究所编写，并作为普通高等学校机电类专业“九五”规划教材出版。此后，在1997年4月举行的第二次教学指导委员会会议，详尽审阅了该教材的编写大纲，会后做了修改，同时又书面征求了各委员的意见，在此基础上开始编写。本书于1998年8月完成初稿和主审，并提交第三次教学指导委员会审定。作者详细听取了委员们的意见，并进行了修改和补充。

本书内容涉及动力机械、热能及制冷工程中主要参数的测量原理和技术、测试系统以及测量误差分析和数据处理，既包括基础知识，又力求反映该领域中测试技术的新进展。

本书由严兆大教授主编，其中第一、二、三、十二章由严兆大编写，第四、五、六、十章由王振子编写，第七、八、九、十一、十三章由俞小莉编写。全书由江苏理工大学高宗英教授主审。

本书的编写参考了许多兄弟院校的资料，得到了全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会和许多同行的关心和支持，特此一并致以深深的谢意。

由于本书内容涉及面广，而编者水平有限，故缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

编者

目 录

第3版前言

第2版前言

第1版前言

第1章 绪论	1	第5章 力与压力测量	76
1.1 测试工作的内涵及作用	1	5.1 概述	76
1.2 测试系统的基本组成	1	5.2 常用力与压力传感器	77
1.3 测量的基本类别	2	5.3 动态压力测量	86
1.4 测试技术的发展及其在热能与动力 工程领域的应用概况	4	思考题与习题	96
1.5 热能与动力工程测试技术课程学习 要求	4	第6章 流速测量	97
思考题与习题	4	6.1 皮托管测速技术	97
第2章 测量系统的基本特性	5	6.2 热线(热膜)测速技术	102
2.1 概述	5	6.3 激光多普勒测速技术	105
2.2 理想测量系统及其主要性质	5	6.4 粒子图像测速技术	111
2.3 测量系统的静态特性	6	思考题与习题	116
2.4 测量系统的动态特性	10	第7章 流量测量	117
思考题与习题	20	7.1 概述	117
第3章 测量误差分析及数据处理	22	7.2 节流式流量计	120
3.1 测量误差的基本概念	22	7.3 涡轮流量计	125
3.2 随机误差分析与表达	23	7.4 光纤流量计	129
3.3 系统误差分析与处理	26	7.5 超声波流量计	131
3.4 疏失误差的消除	31	7.6 电磁流量计	133
3.5 测量误差的计算	36	7.7 质量型流量计	134
3.6 测试数据的处理方法	42	思考题与习题	138
思考题与习题	51	第8章 液位测量	139
第4章 温度测量	53	8.1 差压式液位计	139
4.1 概述	53	8.2 电容式液位计	143
4.2 接触式测温计	55	8.3 电阻式液位计	145
4.3 非接触式热辐射测温技术	67	8.4 光纤液位计	147
思考题与习题	75	8.5 超声波液位计	149
		思考题与习题	150
		第9章 转速、转矩和功率测量	151

9.1 转速测量	151	11.2 振动测量的基本原理	189
9.2 转矩测量	153	11.3 测振系统概述	191
9.3 功率测量	159	11.4 振动参数测量	193
思考题与习题	171	11.5 模态测量	202
第 10 章 排放测量	173	11.6 振动测量实例	207
10.1 概述	173	思考题与习题	209
10.2 色谱分析仪	174	第 12 章 噪声测量	211
10.3 红外气体分析技术	175	12.1 噪声测量中的基本声学概念	211
10.4 常用组分浓度测量技术	177	12.2 声级计算	215
10.5 颗粒物排放测量技术	182	12.3 噪声评定值	217
10.6 排放测量采样方法	186	12.4 噪声测量技术	218
思考题与习题	188	12.5 噪声测量仪器	224
第 11 章 振动测量	189	思考题与习题	231
11.1 概述	189	参考文献	232

绪 论

1.1 测试工作的内涵及作用

测试与测量有时可以视为相同，但是，严格意义上两者是有区别的。测量是一个试验过程，被测量及其获取途径和方法通常都是已经确定的，它的核心任务是确定被测量的属性量值；而测试则包含试验过程，是具有试验性质的测量，有一定的探索性，它更多地与科研生产中的具体实际问题直接关联，涉及被测试对象状态信息表达与输出问题，需要完成测量原理和方法确定、测量系统构建，以及测量数据处理分析和评判等工作内容。

测试工作作为科学研究、技术开发和生产检验等过程所不可缺少的环节，其在工程领域的主要作用包括：

1) 状态监测。通过测取机器或设备使用过程中出现的诸多现象来判断其工作状态或性能是否正常。例如，通过在线检测轴承等摩擦副的振动噪声或润滑油温升来监视其运行状态。

2) 过程控制。通过测取机器或设备使用过程中的某些运行参数，作为反馈信号，进行机器或设备运行状态的控制。例如，通过在线测量内燃机排气中的氧含量，可以为空燃比精确控制提供反馈信号。

3) 工程分析。解决工程实际问题时，包括专项技术研究和产品开发等过程，如果缺乏完善的理论指导，通常会采用试验研究的方法，即通过测试数据来分析研究各因素之间的相互关系及变化规律。例如，开展机器或设备承力零部件的材料和工艺创新设计时，需要测试新材料的力学性能，用于零件结构强度校核，同时需要测试额定载荷作用下零件的应力及其分布状态随不同工艺方案的变化，用于研究不同工艺对零件强度和寿命的影响。

1.2 测试系统的基本组成

测试系统一般由试验装置和测量系统两大部分组成，如图 1-1 所示。

试验装置的核心作用是表达与输出被测试对象的待测信息，它是测试系统的“信号发

生器”。有的待测信息在被测试对象处于自然工作状态下就能够显现（如内燃机或锅炉中的温度信息等），有的待测信息则只有在被测试对象受到激励后才能产生（如结构件的自由模态信息等）。可见，对试验装置的基本要求是全面、准确地产生能够表达被测试对象状态的信息，并以便于测量的信号呈现。

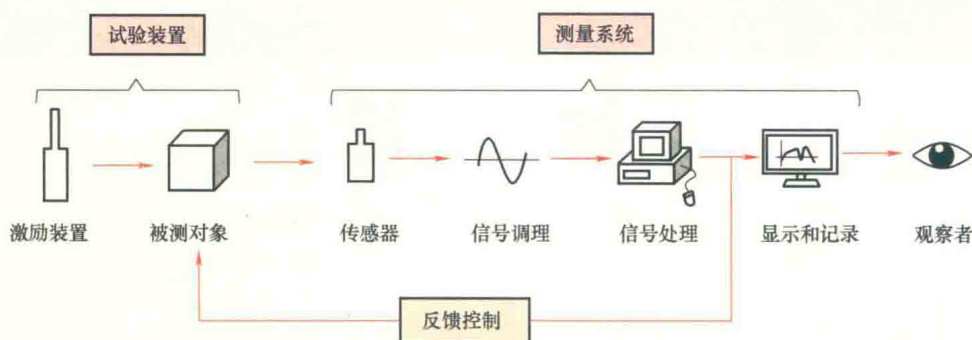


图 1-1 测试系统的基本组成

测量系统主要由传感器、信号调理单元、信号处理单元以及显示和记录单元等构成。

传感器是指能够感受被测量，并按照一定的规律将其转换成可输出信号的器件或装置，由信号敏感元件和信号变换元件构成，二者常为一体。信号敏感元件是传感器中能够直接感受或响应被测量的部分，其理想的特性是仅对被测量敏感。信号变换元件是传感器中将敏感元件感受到或做出响应的被测量转换成适合于传输并测量的物理量的部分。在现代测试技术中，电信号是最适合传递、处理和定量运算的物理量。因此，测量温度、压力、位移、速度等物理量的传感器的输出通常是电量。

信号调理单元的主要功能是把来自传感器的信号转换成更适合于进一步传输和处理的形式。这种信号的转换，多数是电信号之间的转换，如幅值放大、调制处理和滤波处理等，在采用计算机的测试系统中还包含模-数（A-D）转换。

信号处理单元的任务是对来自信号调理环节的信号进行各种运算和分析。

信号显示和记录单元的作用是为了便于观察的形式来显示和存储测试结果。

1.3 测量的基本类别

1. 按照获得测量结果的过程分类

(1) 直接测量 直接通过测量仪器得到被测量量值的测量为直接测量。例如，使用温度计测量温度、使用天平称重等。

(2) 间接测量 被测量的量值无法从测量仪器上直接获取，但与其他可以直接测量的物理量有确定的函数关系，可以先测量其他物理量，然后通过已知的函数关系求得被测量，这种方法称为间接测量法。例如，测量发动机的输出功率 $P(\text{kW})$ 时，需要先测量发动机的转速 $n(\text{r/min})$ 和转矩 $M(\text{N}\cdot\text{m})$ ，然后通过公式 $P=Mn$ 计算相应的功率 P 。

(3) 组合测量 当被测量的测量结果需要用多个参数表达时，可通过改变测试条件进行多次测量，根据被测量与参数间的函数关系列出方程组并求解，最终确定被测量的量值，这种测量方法称为组合测量。由于被测量的量值需要经过求解联立方程组才能确定，所以又

称其为联立测量。例如，热电阻温度系数的测量，已知热电阻和温度的关系为

$$R_T = R_0(1 + aT + bT^2) \quad (1-1)$$

式中， R_T 是温度为 $T(^{\circ}\text{C})$ 时的电阻值(Ω)； R_0 是温度为 0°C 时的电阻值(Ω)； a 、 b 为热电阻的温度系数($\Omega/^{\circ}\text{C}$)。

可见，在 R_0 已知的情况下，为了确定 a 、 b ，需要先测得不同温度 T_1 、 T_2 下的电阻值 R_{T_1} 和 R_{T_2} ，然后通过联立求解以下方程组才能获得 a 、 b 的数值。

$$\begin{cases} R_{T_1} = R_0(1 + aT_1 + bT_1^2) \\ R_{T_2} = R_0(1 + aT_2 + bT_2^2) \end{cases} \quad (1-2)$$

为了提高测量精度，可以增加多组温度和电阻值的测量组合，然后采用最小二乘法确定 a 、 b 的数值。

2. 按照测量条件分类

(1) 等精度测量 等精度测量是指在测量条件（包括测量仪器、测量人员、测量方法及环境条件等）不变的情况下，对同一被测量进行多次测量。

等精度测量获得的各个测量值具有相同的精度，可以用同一均方根偏差表示。

(2) 非等精度测量 如果在同一被测量的多次重复测量中，不是所有测量条件都维持不变，那么，这样的测量称为非等精度测量。

根据上述分类准则，同一测量人员采用相同的测量方法和仪器，在较长的时间内对同一被测量进行的多次重复测量，或者是在不同的实验室采用相同的条件对相同的被测量进行的多次重复测量，有可能是等精度测量，也有可能是非等精度测量，是否为等精度测量，需要对测量结果进行等方差性检验。由于性质的差异，等精度测量与非等精度测量结果的数据处理方法也不相同，这部分内容将在后面章节述及。

3. 按照测量对象的时空变化性质分类

(1) 稳态和非稳态测量 稳态测量也称静态测量，是针对量值不随时间变化的被测量实施的测量。

非稳态测量也称动态测量，是针对随时间变化的被测量实施的测量，其目的是确定被测量的瞬时值或被测量随时间的变化规律。

被测量的时间变化特性是相对的，决定采用静态测量还是动态测量，除了与被测对象本身的变化程度有关之外，还与测试要求有关。例如，当发动机运行在过渡工况时，由于其转矩和转速变化相对显著，相应的测量必须采用动态测量；而当发动机运行在稳定工况时，其转矩和转速的变化仅由工作循环的微小波动引起，幅度很小，如果只是为了获得相应工况下发动机的输出功率，则采用稳态测量方法即可，但是，如果需要通过转矩和转速的信号波动来了解发动机工作循环的一致性，则需要采用动态测量方法。

(2) 单点测量和分布测量 被测对象特有的体积属性可能导致两种状态：一种是被测量量值在其空间范围内是均匀一致的；另一种则是处于不均匀分布状态。对上述两种分布状态的被测量进行测量时，前者可以采用单点测量方法，即只需要选择一个测点进行测量，测量结果就能够反映被测对象的参数水平；而对于后者，需要进行多点测量或者扫描测量（本书统称为分布测量），然后进行被测量量值的空间分布特性统计分析。

同样，决定采用单点测量、多点测量还是扫描测量，除了与被测量本身的分布差异有关外，还与测试要求有关。例如，对某一空调环境的温度实施测量时，如果测量结果仅用于衡

量环境总体温度水平的高低,则选取某一特征点实施单点测量即可;但是,如果测量结果用作环境空间温度均匀性控制的信号,则需要实施分布测量。

1.4 测试技术的发展及其在热能与动力工程领域的应用概况

测试技术的发展与科学技术的进步可谓相得益彰。伴随着科学技术的进步,测试技术已经发展成为一门相对完整、独立的学科,而且是深度交叉融合了传感技术、计算机及信息技术、应用数学及自动控制等理论的学科。一方面,测试技术的发展为各项科学技术的研究提供了坚实的基础信息获取手段,通过大量基础信息的挖掘,促进了新现象的发现和新技术、新技术的发明;另一方面,科学技术的不断进步在对测试技术提出更新要求的同时,也支撑了测试技术的发展,例如,测试领域多传感器融合、可视化、远程遥感等技术的发展。从总体上看,测试技术的发展趋势是传感器技术的智能化、集成化和网络化,以及以计算机为核心的测试仪器的高精度化、多功能化、自动化等。

与其他学科一样,在热能与动力工程领域,测试技术的应用发展也有明显的阶段性。20世纪50年代以前,参数测量较多采用机械式传感器,如弹簧压力表、膨胀式温度计等。进入20世纪60年代后,开始应用非电量电测技术和相应的二次仪表,使测试技术上上了一个新的台阶。20世纪80年代,人们开始应用计算机和智能化仪表,以实现动态参数的实时检测和处理。随后,许多新型测试技术相继出现,如激光全息摄影技术、光纤传感技术、红外CT技术、超声波测试技术、虚拟测试及网络化测试技术等,并逐步深入到热能与动力工程研究的各个领域,实现了燃烧过程、流动过程、燃烧产物的浓度和粒度场,以及其他传热传质过程瞬变动态参数的测量,得以从对宏观、稳态过程的研究深入到对微观、瞬变过程的研究,不断掌握各种物理化学过程内在的变化规律,为相关优化设计与控制理论及技术的发展提供科学基础。

1.5 热能与动力工程测试技术课程学习要求

如前所述,现代测试技术是一门多学科交叉的综合技术,涉及传感技术、信号处理技术、计算机技术以及控制技术等,只有理解其中的相关理论,才能更好地应用或发展测试技术,这就需要学习者预先掌握物理学、化学、力学、光学、电学、数学等基础理论学科的基本知识。此外,热能与动力工程领域的测试对象以热力机械为主,涵盖流动、传热、燃烧、机构运动与受力以及振动噪声等物理化学现象的测试工作,因此,还需要预修流体力学、传热学、燃烧学、结构动力学等专业基础知识。

测试技术也是实验学的分支,相关的理论学习必须结合实践,通过开展实际的试验测试,可以更好地理解理论、训练技能。

思考题与习题

- 1-1 测量方法有哪几类,直接测量与间接测量的主要区别是什么?
- 1-2 试述现代测试技术及仪器的发展方向。

第 2 章

测量系统的基本特性

2.1 概述

设计或选择测量系统是测试工作的一项重要任务，需要将被测量信号的性质、测量精度和测试环节性价比要求等因素与测量系统的性能进行匹配。因此，了解测量系统的基本特性是有必要的。

测量系统的基本特性是指其对被测量信号的响应性能，表现为被测量信号通过测量系统前后的变换关系。图 2-1 是表示被测量信号与测量系统之间输入输出关系的示意图， $x(t)$ 和 $y(t)$ （以下简称 x 和 y ）分别是测量系统的输入信号和输出信号，也可分别称为激励和响应。

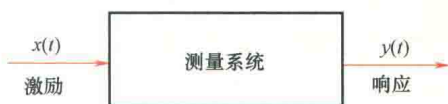


图 2-1 测试系统框图

由于被测量信号具有稳态（静态）和动态两种基本变化特征，测量系统的基本特性也可分为静态特性和动态特性。

本章介绍的测量系统基本特性的相关分析内容也适用于测量系统的各个组成部分，包括传感器、信号调理单元、显示和记录单元等。

2.2 理想测量系统及其主要性质

测量系统的输入输出关系应该是单值的、确定的，即其输入量与输出量之间应具有一一对应的明确关系。显而易见，理想的输出与输入关系是线性关系。但是，实际的测量系统很难完全具有这种性质，只能在较小的工作范围内和一定的误差允许条件下满足线性要求。

对于线性系统，输入和输出之间的关系可以用线性微分方程表达，即

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (2-1)$$

式中， x 和 y 为测量系统的输入量和输出量； t 为时间； $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_n$ 与 $b_0, b_1, b_2, \cdots, b_m$ 是反映测量系统物理结构的特性参数； n 为输出量的最高微分阶，称为测量系统的阶。

如果 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ 与 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_m$ 在测量系统工作过程中不随时间和输入量的变化而变化, 则称该系统为时不变线性系统。

时不变线性系统是理想的测量系统, 由于实际的测量系统中各元器件的物理参数并不是常数, 如电子元件中的电阻、电容和半导体器件等的特性都会受温度的影响而发生变化, 导致上述微分方程特性参数具有时变性, 这意味着理想的时不变线性系统在现实中是不存在的。对此, 工程实际中常用的处理方法是在保证具有足够精确度的条件下, 忽略非线性和时变因素, 认为上述特性参数是常数, 即将测量系统当作时不变线性系统处理。本书以下部分出现的线性系统指的都是时不变线性系统。

线性系统具有以下主要性质 (以下用 $x \rightarrow y$ 表示输入输出对应关系)。

(1) 比例性质 当线性系统的输入扩大 k 倍时, 其输出也将扩大 k 倍, 即

$$kx \rightarrow ky$$

(2) 叠加性质 当线性系统同时接收到多个输入时, 其总输出等于各个输入单独作用时的输出之和, 即

$$[x_1 \pm x_2 \pm \dots \pm x_n] \rightarrow [y_1 \pm y_2 \pm \dots \pm y_n]$$

线性系统的叠加性质表明, 各个输入产生的响应是相互独立的, 互不干扰。因此, 可以将一个复杂的输入分解成一系列简单的输入之和, 系统对复杂激励的响应便等于这些简单输入的响应之和。

(3) 微分性质 线性系统对输入导数的响应等于对该输入响应的导数, 即

$$\frac{dx}{dt} \rightarrow \frac{dy}{dt}$$

(4) 积分性质 当线性系统的初始状态为零 (即输入为零, 响应也为零) 时, 对输入积分的响应等于对该输入响应的积分, 即

$$\int_0^t x dt \rightarrow \int_0^t y dt$$

(5) 频率保持性质 当线性系统的输入为某一频率的简谐信号时, 其稳态响应必是同一频率的简谐信号。如果输入信号为 $x = x_0 \sin \omega t$, 则相应的输出为

$$y = y_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

式中, ω 为输入角频率; φ 为相位角。

线性系统的频率保持性质是信号识别的重要依据, 工程实际中常用作信号滤波和故障诊断等的依据。

2.3 测量系统的静态特性

2.3.1 测量系统静态特性参数的基本定义

1. 量程

量程是指测量系统所能测量的最大输入量与最小输入量之间的范围。为了提高测量结果的精确度, 通常按照被测量量值落在 $2/3 \sim 3/4$ 量程范围来选择测试系统的量程。

2. 精度等级

测量系统的精度(精确度)是指测量值与真值(或约定值)之间的符合程度。通常用引用误差来表示,即系统在量程范围内每单位输入可能存在的最大输出误差。该误差的量值一般采用标准仪器进行静态校准来获得。校准时,在全量程(A)范围内,如果标准仪器与被校准的测量系统之间存在的最大输出绝对误差为 δ_{\max} ,则测量系统的引用误差为

$$R = \frac{|\delta_{\max}|}{A} \times 100\%$$

上述引用误差的最大限值也称系统的允许误差。如果测量系统的允许误差为1.5%,则其精度等级为1.5级。常见的精度等级有0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5和5.0共7级。

3. 线性度

线性系统在静态测量条件下工作时,其输入输出关系式(2-1)中的各导数项均等于零,于是有

$$y = \frac{a_0}{b_0} x \quad (2-2)$$

式(2-2)即为测量系统的理想静态特性方程,它反映的是系统输入输出之间理想的直线关系。而实际的测量系统,其输入输出曲线并不是理想的直线,线性度就是度量测量系统输入输出关系接近线性程度的指标。

在静态测量中,通常用试验的方法来确定测量系统的线性度。首先测取系统的输入输出关系曲线,通常称之为标定曲线,也称定度曲线。同时,采用最小二乘法对标定结果进行线性拟合,得到拟合直线。标定曲线偏离其拟合直线的程度即为线性度,用线性误差表示。如图2-2所示,在全量程 A 内,标定曲线与其拟合直线之间的最大偏差为 ΔL_{\max} ,满量程输出值为 Y_{FS} ,即线性误差为

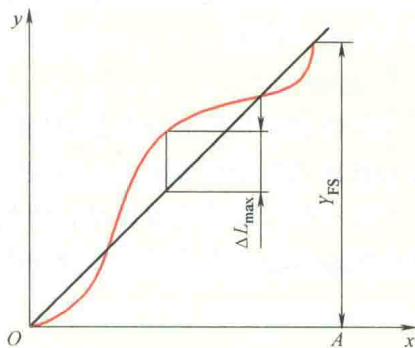


图2-2 线性度

$$\delta_x = \frac{|\Delta L_{\max}|}{Y_{FS}} \times 100\% \quad (2-3)$$

4. 灵敏度

测量系统输入量的变化量 Δx 引起输出量改变量 Δy ,则定义灵敏度为

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx} \quad (2-4)$$

灵敏度反映的是测量系统每单位输入对应的输出量值,其几何意义是测量系统输入输出曲线上指定点的斜率。对于线性系统而言,灵敏度为常数。由于实际的测量系统往往是非线性的,所以其灵敏度会随输入量的变化而变化。

灵敏度的量纲取决于输入和输出的量纲,当输入与输出的量纲相同时,灵敏度是一个量纲一的数,常称为“放大倍数”或“增益”。

当测量系统由多个环节串联组成时,总的灵敏度等于各个环节灵敏度的乘积。

应该指出,测量系统的灵敏度越高,测量范围越窄,系统稳定性越差。因此,应合理选