

电子工程师手册

ELECTRONICS ENGINEERS' HANDBOOK

上册

第12篇 机械量的电子测量

主 编	金篆芷
执 笔	金篆芷
	张爱萍
	楚晓华
	林玉池
	安国振
主 审	强锡富

电子工程师手册

电子工程师手册编辑委员会 编

下 册



机械工业出版社

(京)新登字054号

本手册系统地概括了电子技术基础及其应用领域的主要技术内容，有一定的深度和广度。

全书按其内容，大体上可分为如下三个部分：

1. 基础知识部分，包括：常用符号、物理化学常数、单位、标准和数学公式；电磁学与电路基础；信号与系统分析等。
2. 技术基础部分，包括：电子材料；电子元器件；模拟电路；数字电路；微波、电波传播与天线；电子产品的工艺、结构、电磁兼容与可靠性。
3. 技术应用部分，包括：电力电子技术；电子测量与电子仪器；机械量的电子测量；电子计算机与人工智能；自动控制系统与控制仪表；数控技术与机器人；广播、电视与声像处理技术；通信、雷达、导航与电子对抗；医疗电子技术。

本书在编写上，力求简明扼要、深入浅出、直观易懂、归类便查。注意理论阐述的严谨和采用数据、图表和公式的准确可靠。努力做到既反映我国电子技术近年来的主要成就，也介绍国外的先进技术和发展动向。

本手册主要供机电工业系统和其他行业系统的工程技术人员在处理专业工作中涉及电子技术问题时查阅使用，也可供大专院校有关专业师生参考。

电子工程师手册

电子工程师手册编辑委员会 编

责任编辑：贾 馨 版式设计：霍永明
封面设计：姚 毅 责任校对：肖新民
责任印制：路 琳

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京房山区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张 182¹/₂·插页 8·字数 5756 千字

1995年4月北京第1版·1995年4月北京第1次印刷

印数 00,001—10 000 定价：上、下册共198.00元

ISBN 7-111-04178-X/TM·523

发展电子技术促
进经济繁荣与社
会进步

孙俊人

一九八二年六月

中国电子学会理事长孙俊人为本书题词

电子工程师手册编委会

主任委员	吴咏诗					
副主任委员	胡健栋	邹洵	罗命钧(常务)			
委	翁瑞琪(常务)		秦起佑(常务)	张长生		
员	黄仕机	周孝琪	阚石	俞斯乐	丁润涛	
	郭维廉	徐苓安	张国雄	朱梦周		
总编辑	吴咏诗					
副总编辑	秦起佑	翁瑞琪				
秘书	尹明丽					

序

电子技术是一门发展迅速，应用广泛的技术。它的发展可以说是日新月异，新技术层出不穷。它的应用则已遍及工业、农业、国防、科技、文教和人民日常生活的各个领域，对于经济发展和社会进步有着重要的促进作用。当前第三次新的技术革命正在兴起，如果说第一次技术革命是以机械化为标志，第二次技术革命是以电气化为标志的话，那么，第三次新的技术革命就应该说是以电子化作为标志。前两次技术革命主要都是人类体能的延伸，而第三次新的技术革命则主要是人类智能的扩展，其基础就是电子技术。也有人说目前已是信息时代，而信息的获取、处理、传输也是要依赖于电子技术的。所以为了加速我国的现代化建设，体现“科学技术是第一生产力”的伟大作用，在各个领域，尤其是机电工业系统中推广与普及电子技术是十分重要的。在这种情况下，编写和出版这部《电子工程师手册》是很有必要的。

这部手册是为机电工业系统和其他行业系统中具有中等以上技术水平的工程技术人员在处理专业工作中涉及电子技术问题时查阅而编写的，是以应用为主的、综合性的电子技术手册。它是一部工具书，主要为工程技术人员在研究、处理电子技术问题时起备查、提示和启发的作用。它也可为高等学校有关专业师生及其他有关人员提供参考。

这部手册系统地概括了电子技术及其主要应用领域的基本技术内容。在内容取舍上力求做到：科学性、实用性和先进性。科学性是要体现现代电子科学技术的基本内容，介绍必要的基础知识，注意理论阐述的严谨，采用数据、图表的准确可靠；实用性是要从实用出发建立自己的体系，主要提供一些结论性的技术内容以及这些结论的应用，在编写上简明扼要，深入浅出，直观易懂，归类便查；先进性则是既要反映我国电子技术近年的主要成就，也要介绍国外的先进技术和发展动向，注意反映电子技术的时代特征。

整个手册共17篇，按其内容大体上可分为以下三个部分：

(1) 基础知识 共2篇，分别是：常用资料（符号、常数、单位、标准和数学公式）；电磁学与电路基础。

(2) 技术基础 共6篇，分别是：电子材料；电子元器件；模拟电路；数字电路；微波技术、电波传播与天线；电子产品的工艺、结构与可靠性。

(3) 技术应用 共9篇，分别是：电力电子技术；电子测量与电子仪器；机械量的电子测量；电子计算机；自动控制与控制仪表；电子技术在机械制造方面的应用；广播、电视与声像技术；通信、雷达、导航与电子对抗；医疗电子技术。

这部手册的编写方式也是一种改革的尝试。过去一部综合性手册的编写一般是组织全国各地的有关专家分头编写，然后集中统稿编辑的。由于专家分散在全国各地，联系讨论不便，统稿、编辑过程中也要往返于各地进行讨论、修改，这就不能不拖延时日，往往要5~6年，大型的甚至要8~10年才能出版。电子技术发展非常迅速，如果从编写到出版要花这样长的时间，那么，手册出版之日可能已是内容陈旧之时。因此，这部手册是主要聘请天

津、北京两地的有关专家编写、审稿，而且由机械工业出版社委托天津大学承担了具体的组织工作。由于编写人员居住相对集中，便于交流与讨论，主编与主审也能及时交换意见，除出版社外，还有一个专业面较宽的学术单位负责组织工作，这就使整个手册的编写、审稿和定稿工作在两年之内顺利完成，而且保证了质量，基本上达到了预定的目标和要求。应该说这种做法是成功的，不足之处则可能是未能充分反映其他各地有关专家的经验与成就，这就希望各位专家和广大读者对本手册多提宝贵意见，以便今后能予以修改和补充。

这部手册能以顺利地完成和出版，我愿诚挚地感谢编委会各位委员、各篇的主编、主审以及全体编者所付出的辛勤劳动，感谢他们认真负责的态度和友好合作的精神。我还要特别感谢机械工业出版社的罗命钧、秦起佑、贾馨三位同志和天津大学的翁瑞琪教授，他们为本手册的组织编写、统稿定稿、编辑出版做了大量的工作，为保证手册的质量做出了重要的贡献。

我希望，这部手册的出版，能为有关专业的工程技术人员和高等学校的师生，在从事电子技术应用与推广工作中提供一本实用的工具书。如果它能为我国电子技术的广泛应用起到一些促进作用的话，这将使我们所有这些参加手册编写、出版工作的同志感到荣幸和欣慰。

吴咏诗

目 录

第1章 概 论

- 1 机械量电子测量技术的特点12-1
- 2 机械量电子测量系统的组成12-1
- 3 测量系统的特性12-1
 - 3.1 测量系统的静态特性12-1
 - 3.2 测量系统的动态特性12-1
- 4 测量系统的标定和校准12-9
 - 4.1 测量系统的标定12-9
 - 4.2 测量系统的校准12-9

第2章 常用传感器的变换原理 及检测技术

- 1 传感器与传感器分类12-10
 - 1.1 传感器及其组成12-10
 - 1.2 传感器分类12-10
- 2 传感器技术指标和输入、输出特性12-11
 - 2.1 传感器的技术指标12-11
 - 2.2 传感器的输入、输出特性和对环境的要求12-11
- 3 各种变换原理传感器的特点及应用12-13
- 4 电阻式传感器12-15
 - 4.1 电阻应变片式传感器12-15
 - 4.2 固态压阻式传感器12-17
 - 4.3 电位器式传感器12-17
- 5 电感式传感器12-19
 - 5.1 自感式传感器12-19
 - 5.2 互感式传感器12-19
 - 5.3 电涡流式传感器12-21
 - 5.4 压磁式传感器12-21
 - 5.5 感应同步器12-21
- 6 磁电式传感器12-26
 - 6.1 磁电感应式传感器12-26
 - 6.2 霍尔式传感器12-28
 - 6.3 磁栅式传感器12-28

- 7 压电式传感器12-28
 - 7.1 压电效应12-28
 - 7.2 压电式传感器的压电元件12-30
 - 7.3 压电声表面波传感器12-30
- 8 电容式传感器12-30
 - 8.1 类型及工作原理12-30
 - 8.2 转换电路12-30
 - 8.3 容栅式传感器12-30
- 9 光电式传感器12-35
 - 9.1 光电式传感器的基本组成12-35
 - 9.2 一般形式的光电传感器12-35
 - 9.3 光纤式传感器12-35
 - 9.4 光栅式传感器12-37
 - 9.5 固体图象传感器12-38
 - 9.6 光学编码器式传感器12-38
 - 9.7 激光测量装置12-38
- 10 热电式传感器12-43
 - 10.1 热电偶的工作原理12-43
 - 10.2 热电偶基本定律12-43
- 11 气电式传感器12-44
- 12 陀螺式传感器12-46
 - 12.1 陀螺原理12-46
 - 12.2 机械陀螺12-46
 - 12.3 光纤陀螺12-46
- 13 谐振式传感器12-46
 - 13.1 振弦式传感器12-47
 - 13.2 振筒式传感器12-47
 - 13.3 振膜式传感器12-48
 - 13.4 振梁式传感器12-49
 - 13.5 石英晶体谐振式传感器12-49
- 14 力平衡式传感器12-51
- 15 超声波、微波、红外辐射、核辐射检测12-51
 - 15.1 声波和电磁波的频率界限12-51
 - 15.2 超声波检测12-51
 - 15.3 微波检测12-52
 - 15.4 红外辐射检测12-53

15.5 核辐射检测	12-53	3.1 振弦法	12-109
第3章 机械量电子测量电路		3.2 光电法	12-112
1 对测量电路的要求及相应措施	12-56	3.3 光纤法	12-113
1.1 提高信号选取能力与抗干扰能力 的措施	12-56	3.4 霍尔法	12-114
1.2 提高稳定性措施	12-56	4 微小尺寸的电子测量	12-114
1.3 提高线性度措施	12-56	4.1 金属丝直径的激光衍射测量 法	12-114
1.4 频率特性及响应速度	12-56	4.2 光纤直径的激光能量测量法	12-115
2 测量电路的输入信号	12-56	4.3 磁头与磁盘间隙的光波干涉测 量法	12-115
3 测量电路的类型与组成	12-56	4.4 小孔径测量法	12-115
4 相敏检波电路	12-63	5 大尺寸与大位移的电子测量	12-117
4.1 用途	12-63	5.1 激光干涉测量法	12-117
4.2 构成原理	12-63	5.2 感应同步器测量法	12-118
4.3 类型	12-63	5.3 光栅莫尔条纹测量法	12-118
4.4 相敏检波器的鉴相特性及选频 特性	12-63	5.4 三坐标测量机简介	12-118
5 绝对值、峰值和平均值电路	12-71	6 直线度误差的电子测量	12-124
5.1 绝对值电路	12-71	6.1 角差法	12-124
5.2 峰值电路	12-71	6.2 线差法	12-125
5.3 平均值运算电路	12-77	7 圆度和表面粗糙度的电子 测量	12-126
6 细分与辨向电路	12-78	7.1 圆度误差的测量	12-126
6.1 细分电路	12-78	7.2 表面粗糙度的测量	12-126
6.2 辨向电路	12-85	第5章 角度和角位移的电子测量	
7 脉冲当量换算电路	12-92	1 角度测量的特点和方法	12-130
7.1 乘法器	12-92	1.1 角度测量的基本特点	12-130
7.2 脉冲删增电路	12-94	1.2 角度和角位移的测量方法	12-130
7.3 乘系数电路	12-95	2 角度和角位移的电子测量	12-130
7.4 计算机换算	12-96	2.1 角度和角位移传感器及其主要 性能	12-130
8 线性化处理电路	12-96	2.2 圆光栅法	12-130
8.1 折线逼近法及其电路	12-96	2.3 圆磁栅法	12-130
8.2 非线性反馈法及其电路	12-97	2.4 编码盘法	12-132
8.3 多项式逼近法及其电路举例	12-99	2.5 感应同步器法	12-133
第4章 长度和线位移的电子测量		2.6 电位器法	12-134
1 长度测量与线位移测量的 关系	12-101	3 小角度的电子测量	12-135
2 长度和厚度的电子测量	12-101	3.1 小角度测量的特点与方法	12-135
2.1 电阻法	12-101	3.2 光电自准直仪法	12-135
2.2 电感法	12-103	3.3 电子水平仪法	12-136
2.3 电容法	12-104	3.4 激光干涉法	12-136
3 线位移的电子测量	12-109	4 度盘分度误差的检定	12-137
		4.1 度盘分度误差的评定指标	12-137

4.2 度盘分度误差的检定方法	12-137	4.4 电感法	12-173
4.3 光电式度盘自动检查仪	12-137	4.5 谐振法	12-173
4.4 光栅式度盘检查仪	12-139	4.6 磁电感应法 (速度法)	12-174
5 齿轮整体误差的测量	12-139	4.7 力平衡法	12-174
5.1 齿轮整体误差	12-139	4.8 光纤法	12-175
5.2 齿轮整体误差测量法	12-139	5 机械阻抗的电子测量	12-175
5.3 齿轮整体误差测量仪器	12-141	5.1 机械阻抗的概念和定义	12-175
6 传动链传动误差的测量	12-143	5.2 振动的激励和激励器	12-175
6.1 传动误差及其测量方法分类	12-143	5.3 阻抗头法	12-177
6.2 传动链传动误差的动态测量	12-144	5.4 力传感器和加速度传感器法	12-177
第 6 章 速度和转速的电子测量		6 其他参数的测试	12-178
1 线速度的电子测量	12-147	6.1 谐振频率的测量	12-178
1.1 磁电感应法	12-147	6.2 振动系统固有频率的测量	12-178
1.2 差动变压器法	12-148	6.3 相位差的测量	12-180
1.3 多普勒效应测速法	12-148	6.4 阻尼的测量	12-180
1.4 相关测速法	12-149	7 模态分析简介	12-185
2 角速度的电子测量	12-149	7.1 模态分析概念	12-185
2.1 转子陀螺法	12-149	7.2 模态分析的目的及意义	12-185
2.2 压电陀螺法	12-149	7.3 模态分析方法的分类	12-185
2.3 激光陀螺法	12-151	7.4 频域模态分析的过程及内容	12-185
2.4 光纤陀螺法	12-152	7.5 应用举例	12-187
3 转速的电子测量	12-153	第 8 章 力、扭矩和质量的电子测量	
3.1 磁电法	12-153	1 力与力的基本测量方法	12-188
3.2 光电法	12-154	1.1 力的概念	12-188
3.3 磁阻法	12-155	1.2 测力的方法	12-188
3.4 电容法	12-155	2 力的电子测量	12-188
3.5 电涡流法	12-156	2.1 电阻应变法	12-188
第 7 章 机械振动的电子测量		2.2 压磁法	12-192
1 机械振动的分类和表征参数	12-158	2.3 压电法	12-192
1.1 机械振动的分类	12-158	2.4 差动变压器法	12-195
1.2 各种振动及其表征参数	12-158	2.5 振弦法	12-196
2 机械振动的电子测量法	12-164	3 力传感器的定度	12-197
2.1 电子测振法的分类	12-164	3.1 力值检定系统	12-197
2.2 相对式测振法	12-164	3.2 静态定度	12-199
2.3 绝对式测振法	12-164	3.3 动态定度	12-201
3 振幅的电子测量	12-166	4 切削力的电子测量	12-203
4 加速度的电子测量	12-167	4.1 切削力及其测量	12-203
4.1 压电法	12-167	4.2 电阻应变法	12-204
4.2 电阻法	12-167	4.3 压电法	12-207
4.3 电容法	12-172	5 扭矩的电子测量	12-208
		5.1 扭矩及其测量方法	12-208

5.2 电阻应变法	12-208	3.2 测量方法	12-231
5.3 压磁法	12-210	4 噪声分析仪器	12-232
5.4 电感法	12-211	4.1 频率分析仪器	12-232
5.5 光电法	12-211	4.2 实时频谱分析仪器	12-232
5.6 相位差法	12-211	第10章 机械量电子测试系统与智能化	
5.7 振弦法	12-211	1 测试系统的组成和要求	12-235
5.8 平衡力法	12-211	1.1 系统分类	12-235
6 质量的电子测量	12-212	1.2 系统的组成和要求	12-235
6.1 基本概念	12-212	2 智能传感器	12-236
6.2 电子秤的组成与分类	12-214	2.1 智能传感器的结构	12-236
6.3 电阻应变式电子秤	12-216	2.2 智能传感器的特点	12-237
6.4 磁电式电子天平	12-216	3 微型计算机在测试系统中的 应用	12-238
第9章 声音和噪声的电子测量		3.1 微型计算机控制的测试系统 的特点	12-238
1 基本概念	12-219	3.2 微型计算机控制的智能化系 统的功能	12-238
1.1 声音和噪声	12-219	3.3 微型计算机控制的机械量测试 系统实例	12-241
1.2 声压和声压级	12-219	4 测试系统的抗干扰技术	12-244
1.3 声强和声强级	12-219	4.1 干扰与噪声	12-244
1.4 声功率和声功率级	12-219	4.2 干扰的种类及防护	12-244
1.5 响度和响度级	12-219	4.3 电磁干扰	12-244
1.6 声特性	12-219	4.4 抗干扰技术	12-244
1.7 频谱	12-222	参考文献	12-248
2 声压的电子测量	12-225		
2.1 传声器	12-225		
2.2 传声器灵敏度校准	12-226		
3 机器噪声的电子测量	12-229		
3.1 声级计	12-229		

第1章 概 论

狭义的机械量是指有关运动和力的物理量,如位移、速度、振动、加速度、力、应力、扭矩、质量、压力、流量等。广义的机械量则将某些几何学量(如长度、厚度、角度等)以及与运动学量、力学量有关的真空、声压、噪声、密度、粘度等也包括在内。在一般文献中还往往把温度包括在内。

1 机械量电子测量技术的特点

机械量电子测量技术是用电子测量方法对机械量进行测量的技术,简称机械量电测技术。它是多种技术的综合。这些技术包括传感器技术、电子测量技术、微电子技术、计算机(特别是微型计算机)技术、自动控制技术等。因此,机械量电测技术具有下列特点:

(1) 测量精确度高、灵敏度高,可测量极微弱的信号,且可在很宽的测量范围内方便地调整灵敏度。

(2) 电测系统惯性小,反应速度快,既能测量缓慢变化的信号,又能测量快速变化的信号。

(3) 电信号易于传送和控制,可实现远距离测量和自动测量。

(4) 易于对信号进行各种运算和处理。

(5) 易于实现多种参数的同时测量、自动巡回检测和生产的自动控制。

(6) 测量结果可用数字显示,可自动记录或自动打印,以便分析研究和长期保存。

(7) 可采用微处理机实现智能化测量。

2 机械量电子测量系统的组成

机械量电子测量系统(或仪器)主要由传感器、测量电路、显示记录装置、辅助电源四部分组成,如图12-1-1所示。随着计算机技术的发展,在系统(或仪器)中采用微型计算机,可有效地提高信息处理能力,使测量系统自动化、智能化。

系统中各部分的功能如下:

1) 传感器 感受被测量并将其转换成电量。

2) 测量电路 对传感器输出的电信号进行放大、变换及处理,使之成为可以显示、记录和控制

的电信号。通常包括放大器、检波器、滤波器、运算电路、模-数转换器、数-模转换器等电路。

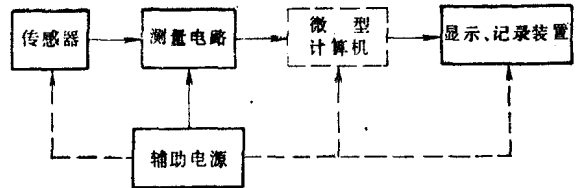


图12-1-1 机械量电子测量系统基本组成框图

3) 微型计算机 进行复杂多样的运算、进行误差自动修正、控制测量过程等。

4) 显示、记录装置 将测量结果以数字或图象形式显示,以数字或曲线形式记录。常用的有电表、显示屏、数字显示器、笔式记录仪、磁带记录仪、光线示波器、自动打印机等。

5) 辅助电源 供给电路所需的直流稳压电源,并供给某些传感器所要求的交流电源。

3 测量系统的特性

测量系统(或仪器)的特性,包括有静态特性、动态特性和输入、输出特性等,其中最基本的特性是静态和动态特性。

3.1 测量系统的静态特性

1. 静态测量 一般指在测量过程中,被测量不随时间变化或作缓慢变化的测量,如长度的测量。

2. 静态特性 在静态测量中,测量系统的输出-输入关系所确定的性能参数称为静态特性。其重要指标是线性度、灵敏度、滞差和重复性等。采用哪些指标应根据实际需要而确定。

3. 静态特性指标(见表12-1-1)

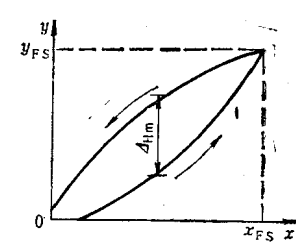
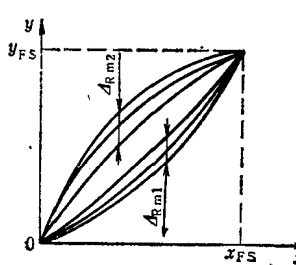
3.2 测量系统的动态特性

1. 动态测量 指在测量过程中,被测量随时间而变化的测量,如振动的测量。

2. 动态特性 指测量系统对于随时间变化的输入量的响应(即输出对输入的反应)特性。

(1) 对于输入为 $x(t)$ 、输出为 $y(t)$ 的线性定常系统,其动态特性的一般数学方程为:

表12-1-1 测量系统或仪器的静态特性

基本指标	定义、公式	说明
线性度 (非线性误差)	<p>在静态测量中, 测量系统输入和输出之间的关系曲线(称校准或标定曲线)对拟合直线的接近程度</p> $\gamma_L = \pm \frac{\Delta_{Lm}}{y_{FS}} \times 100\%$ <p>γ_L—引用非线性误差; Δ_{Lm}—标定曲线对拟合直线的最大偏差; y_{FS}—满量程输出值</p>	<p>选取的拟合直线不同, 所得的线性度数值也不同, 较常用的拟合直线方法有最小二乘法、端点法、端点平移法等, 其中以最小二乘法精度最高, 但计算繁杂</p>
灵敏度 S_0	<p>测量系统在稳态下的输出变化量 Δy 与引起此变化的输入变化量 Δx 之比</p> $S_0 = \frac{\Delta y}{\Delta x}$ <p>灵敏度误差 $\gamma_S = \frac{\Delta S_0}{S_0} \times 100\%$</p>	<p>表示系统对被测量变化的反应能力 灵敏度越高, 测量范围越窄, 稳定性越差</p>
迟滞	<p>测量系统的正向(输入量增大)和反向(输入量减小)输出输入特性曲线的不一致称为迟滞。在测量范围内, 对于某一输入量, 其正反向输出差为最大的值 Δ_{Hm}, 以满量程输出 y_{FS} 的百分数表示为迟滞误差</p> $\gamma_H = \frac{\Delta_{Hm}}{y_{FS}} \times 100\% \text{ 或 } \gamma_H = \pm \frac{1}{2} \frac{\Delta_{Hm}}{y_{FS}} \times 100\%$	<p>迟滞特性一般由实验方法确定</p> 
重复性	<p>测量系统在输入量按同一方向作全量程连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度 重复性误差表示为</p> $1. \gamma_R = \pm \frac{\Delta_{Rm}}{y_{FS}} \times 100\%$ <p>Δ_{Rm}—输出最大重复性偏差; y_{FS}—满量程输出值 此算法所得数据不够可靠</p> $2. \gamma_R = \pm \frac{(2 \sim 3)}{y_{FS}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n - 1)} \times 100\%$ <p>y_i—第 i 次测量值; \bar{y}—测量值的算术平均值; n—测量次数 此算法复杂, 但所得精度高</p>	<p>重复特性用实验方法确定, 重复测量次数取 10~15 次, 特性曲线越一致, 重复性就越好, 误差就越小</p> 
分辨力	仪器或系统所能测得的被测量的最小增量	输入零点附近的分辨力称为阈值
测量范围	仪器或系统能够正常工作的被测量的量值范围	满量程是指其最高值和最低值之差
示值范围	仪器或系统所显示或指示的最低值到最高值范围	—
漂移	输入不变时所引起的输出信号的变化	长时间工作稳定性用零点漂移表征
静态误差	<p>静态测量时的测量误差, 它是多种误差的综合, 常用各单项误差的方和根法表示</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 开环系统输出端的相对误差为各个环节相对误差之和 2. 具有负反馈的闭环系统输出端的相对误差 γ_0 为 $\gamma_0 = \frac{\gamma_1}{1 + S_1 S_2} - \frac{\gamma_2}{1 + \frac{1}{S_1 S_2}}$	<p>γ_1—闭环系统中开环环节的总相对误差; γ_2—反馈环节的总相对误差; S_1、S_2—开环与反馈两个环节输出输入之比 具有负反馈系统可减小总误差</p>

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

式中 $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ 和 $b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$ 为仅与系统结构物理参数有关的常数。

该方程的解就是系统的动态特性，其中通解为系统的暂态响应，特解为稳态响应。通常采用拉氏变换求解，虽可简化运算，但仍较难实现。

(2) 通常分析方法是：输入正弦信号和阶跃

信号，采用传递函数、频率响应函数和脉冲响应函数来描述测量系统或仪器的动态特性，见表12·1-2所示。

3. 动态特性指标 (见表12·1-3)

4. 典型测量系统的动态特性 测量系统按其数学方程的阶数可分为零阶、一阶、二阶和高阶(指三阶和三阶以上)系统。其中绝大多数为一阶、二阶系统，而高阶系统又可视若若干零阶、一阶、二阶系统的组合。零阶、一阶和二阶测量系统的动态特性分别见表12·1-4、表12·1-5和表12·1-6所示。

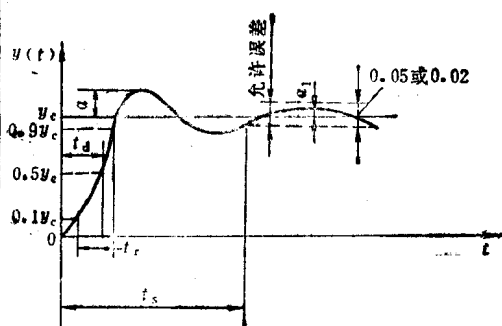
表12·1-2 测量系统或仪器的动态特性

基本特性	定 义、公 式	说 明
传递函数 $H(s)$	初始条件为零时，输出 $y(t)$ 的拉氏变换 $Y(s)$ 和输入 $x(t)$ 的拉氏变换 $X(s)$ 之比 $H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$ s —拉氏变量，也称为复频率， $s = \sigma + j\omega$ ； $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0, b_m, b_{m-1}, \dots, b_1, b_0$ —由测量系统本身特性唯一确定的常数，与输入无关	$H(s)$ 是在复频域 s 内对测量系统传递信号特性进行描述，它只取决于系统本身的结构参数，与输入输出函数无关； $H(s)$ 决定系统的稳态性能和瞬态性能；串联系统 $H(s) = H_1(s) H_2(s)$
频率响应函数 $H(j\omega)$	初始条件为零时，输出的傅里叶变换和输入的傅里叶变换之比，简称频率特性或频率响应 $H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{b_m (j\omega)^m + \dots + b_1 (j\omega) + b_0}{a_n (j\omega)^n + \dots + a_1 (j\omega) + a_0}$ 或 $H(j\omega) = \frac{\int_0^{\infty} y(t) e^{-j\omega t} dt}{\int_0^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt} = H(j\omega) e^{-j\varphi(\omega)}$	$H(j\omega)$ 是在频域 ω 内对系统传递信号特性的描述；系统输入为各频率的正弦信号，输出为与输入同频率的稳态响应，其振幅和相位则发生变化
幅频特性	频率特性 $H(j\omega)$ 的模 (即输出与输入的幅值比) 称为测量系统的幅频特性 $A(\omega) = H(j\omega) $ 以 ω 为自变量和以 $A(\omega)$ 为因变量的曲线称为幅频特性曲线	系统不产生失真应满足 $A(\omega) = A_0$ 为常数 $A(\omega) \neq A_0$ 引起的失真称为幅值失真
相频特性	频率特性 $H(j\omega)$ 的相角 $\varphi(\omega)$ (即输出与输入的相角差) 称为测量系统的相频特性 $\varphi(\omega) = -\arctan H(j\omega)$ 以 ω 为自变量和以 $\varphi(\omega)$ 为因变量的曲线称为相频特性曲线	$\varphi(\omega) = -\varphi_0 \omega$, φ_0 为常数 $\varphi(\omega) \neq -\varphi_0 \omega$ 引起的失真称为相位失真
脉冲响应函数 $h(t)$	初始条件为零时，测量系统对单位脉冲函数的响应，也叫作权函数 $h(t)$ (或 $y_s(t)$) 单位脉冲函数 $\delta(t)$ 为 $\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{当 } t = 0 \\ 0 & \text{当 } t \neq 0 \end{cases} \text{ 和 } \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$ 对于任意输入 $x(t)$ 所引起的输出响应 $y(t)$ 为 $y(t) = h(t) * x(t) = \int_0^t x(\tau) h(t - \tau) d\tau$	是在时域内对系统动态响应特性的描述 当 $\delta(t)$ 的拉氏变换为 1 时，即 $\mathcal{L}[\delta(t)] = X(s) = 1$ ， $h(t)$ 的拉氏变换就是 $H(s)$ ，即 $h(t) = \mathcal{L}^{-1}[H(s)]$ \mathcal{L}^{-1} 为拉氏反变换；* 为卷积

(续)

基本特性	定义、公式	说明
单位阶跃响应函数	初始条件为零时, 测量系统对单位阶跃输入的响应 $y_n(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[H(s) \frac{1}{s} \right]$ \mathcal{L}^{-1} —拉氏反变换	单位阶跃时间函数为 $x(t) = 1(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$ 其拉氏变换 $X(s) = 1/s$
单位斜坡响应函数	初始条件为零时, 测量系统对单位斜坡输入响应 $y_r(t) = \mathcal{L}^{-1} \left[H(s) \frac{1}{s^2} \right]$ \mathcal{L}^{-1} —拉氏反变换	单位斜坡函数 $r(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ t & t > 0 \end{cases}$ 其拉氏变换 $X(s) = 1/s^2$

表12.1-3 测量系统或仪器的动态特性指标

基本特性	性能指标	定义	说明
稳态响应	频率响应范围	是指系统具有足够精度响应的频率范围或称频响范围, 简称频带或通频带	工程上是指输出输入幅值比保持在 $1/\sqrt{2}$ (即 3 dB) 范围内的频率范围
	幅值误差	在频响范围内与理想系统相比产生的幅值误差	是指正弦输入信号系统的响应, 它只与系统物理参数有关, 而与时间无关
	相位误差	在频响范围内与理想系统相比产生的相位误差	
瞬态响应	上升时间 t_r	输出从稳态值 y_0 的 10% 上升到 90% 所需的时间	输入单位阶跃信号的响应, t_s 、 t_r 表征系统响应快慢; α 、 ψ 表征系统稳定性能 
	响应时间 t_s	从输入量开始起作用到输出进入稳定值的允许误差范围 (例如 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$) 内所需的时间	
	超调量 α	输出超过最终稳定值 y_0 的最大量, 常用对最终稳定值之比的百分数 $\alpha/y_0 \times 100\%$ 表示	
	衰减度 ψ	瞬态过程中振荡幅值衰减的速度 $(\alpha - \alpha_1)/\alpha \times 100\%$	
	延迟时间 t_d	响应曲线第一次达到稳定值的一半所需的时间	

系统基本要求: 较好的频率响应特性、较高的灵敏度、较好的快速响应性和较小的时间滞后

表12.1-4 零阶测量系统或仪器的动态特性

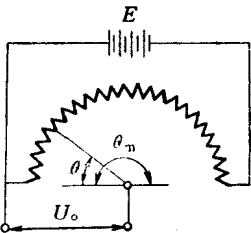
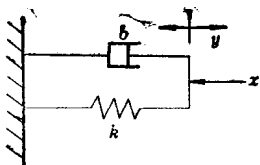
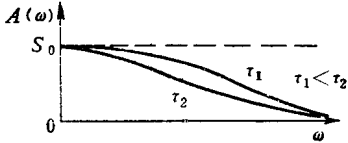
特 性	公 式	图 例 与 说 明
方程式	$y = \frac{b_0}{a_0} x$	 <p>零阶系统无动态误差 电位器式传感器组成的角位移测量系统，当θ变化缓慢时组成零阶系统，其输出 $U_o = S_0 \theta, S_0 = \frac{E}{\theta_m}$</p>
灵敏度 S_0	$S_0 = \frac{b_0}{a_0}$	
传递函数 $H(s)$	$H(s) = \frac{b_0}{a_0} = S_0$ (常量)	
单位阶跃响应函数	$y_u(t) = \frac{b_0}{a_0}$	

表12.1-5 一阶测量系统或仪器的动态特性

特性	公式、特性曲线	说 明	图 例
方程一般形式	$a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_0 x(t)$ 或 $\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = S_0 x(t)$	<ol style="list-style-type: none"> $\tau = a_1/a_0$ 为系统的时间常数，具有时间量纲 $S_0 = b_0/a_0$ 为系统静态灵敏度，具有输出/输入量纲 线性系统中$S_0 =$常数 S_0 在动特性分析中，只起使输出量增加S_0倍的作用 输出幅值随频率ω提高而下降，输出滞后相位则随ω提高而加大，并趋于$\pi/2$ 减小τ可改善频率特性 	1. 弹簧阻尼系统
灵敏度 S_0	$S_0 = \frac{b_0}{a_0}$		
传递函数 $H(s)$	$H(s) = \frac{S_0}{1 + \tau s}$		
频率特性 $H(j\omega)$	$H(j\omega) = \frac{S_0}{\tau j\omega + 1}$		$b \frac{dy}{dt} + ky = b_0 x(t)$ b —阻尼系数； k —弹簧刚度 $\tau = \frac{b}{k}, S_0 = \frac{b_0}{k}$ $H(s) = \frac{b_0/k}{1 + \tau s}$ $A(\omega) = \frac{b_0/k}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$ $\varphi(\omega) = -\arctan(\omega\tau)$
幅频特性 $A(\omega)$	$A(\omega) = \frac{S_0}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}}$ 		
相频特性 $\varphi(\omega)$	$\varphi(\omega) = \arctan(-\omega\tau)$ 