

# 目 录

## 前言

### 第一篇 基础篇

第一章 实验室仪器的分类及作用..... 1	用.....37
第一节 实验室仪器的特点与分类..... 1	三、信息在实验工作中的应用.....38
一、实验室仪器的发展趋势..... 1	四、开展大型实验室间的技术协作.....39
二、实验室仪器和其他科学仪器的定义..... 3	第三章 物理参数探测方法的基本
三、实验室仪器的分类..... 3	知识..... 40
第二节 实验室的发展和管理..... 4	第一节 传感器与实验仪器..... 40

一、质量..... 118

二、物质的量..... 119

第五节 标准时间和频率..... 121

一、时间单位的定义及其物理复现..... 121

二、频率标准及其主要特性..... 122

三、时间频率量值的传递..... 122

第六节 热力学温度..... 123

一、热力学温度和国际温标..... 123

二、标准测温仪器..... 123

三、温标的传递..... 124

第七节 发光强度..... 124

一、发光强度的定义、单位及其复现..... 124

二、发光强度标准灯..... 125

**第二篇 常规实验室仪器及设备**

**第一章 天平..... 127**

第一节 天平的概述和分类..... 127

一、天平的概述..... 127

二、天平的分类..... 128

第二节 天平的计量性能..... 129

一、天平的稳定性..... 129

二、天平的正确性..... 130

三、天平的灵敏度..... 131

四、天平示值的不变性..... 131

五、天平的计量性能之间的关系..... 132

第三节 天平的结构及产品简介..... 132

一、机械天平结构..... 132

二、电子天平结构..... 135

三、国产天平产品简介..... 136

四、国外天平产品简介..... 136

第四节 天平的安装..... 156

一、安装前的准备..... 156

二、国产机械天平的安装..... 156

三、国产电子天平的安装..... 159

四、国外电子天平的安装..... 160

第七节 天平的检定..... 171

一、天平的精确度类别..... 171

二、天平的计量性能及技术要求..... 172

三、天平的检定方法和检定周期..... 174

**第二章 热分析仪器..... 177**

第一节 原理与结构..... 177

一、差热仪..... 177

二、差示扫描热量计..... 177

三、常规热天平..... 177

四、热机械分析仪..... 178

五、微机化热分析仪器..... 178

第二节 主要技术性能..... 179

一、温度范围..... 179

二、升温速率及程序方式..... 179

三、热分析量程..... 179

四、气氛..... 179

五、试样量..... 179

六、实用性指标..... 179

七、自动化程度及数据处理功能..... 180

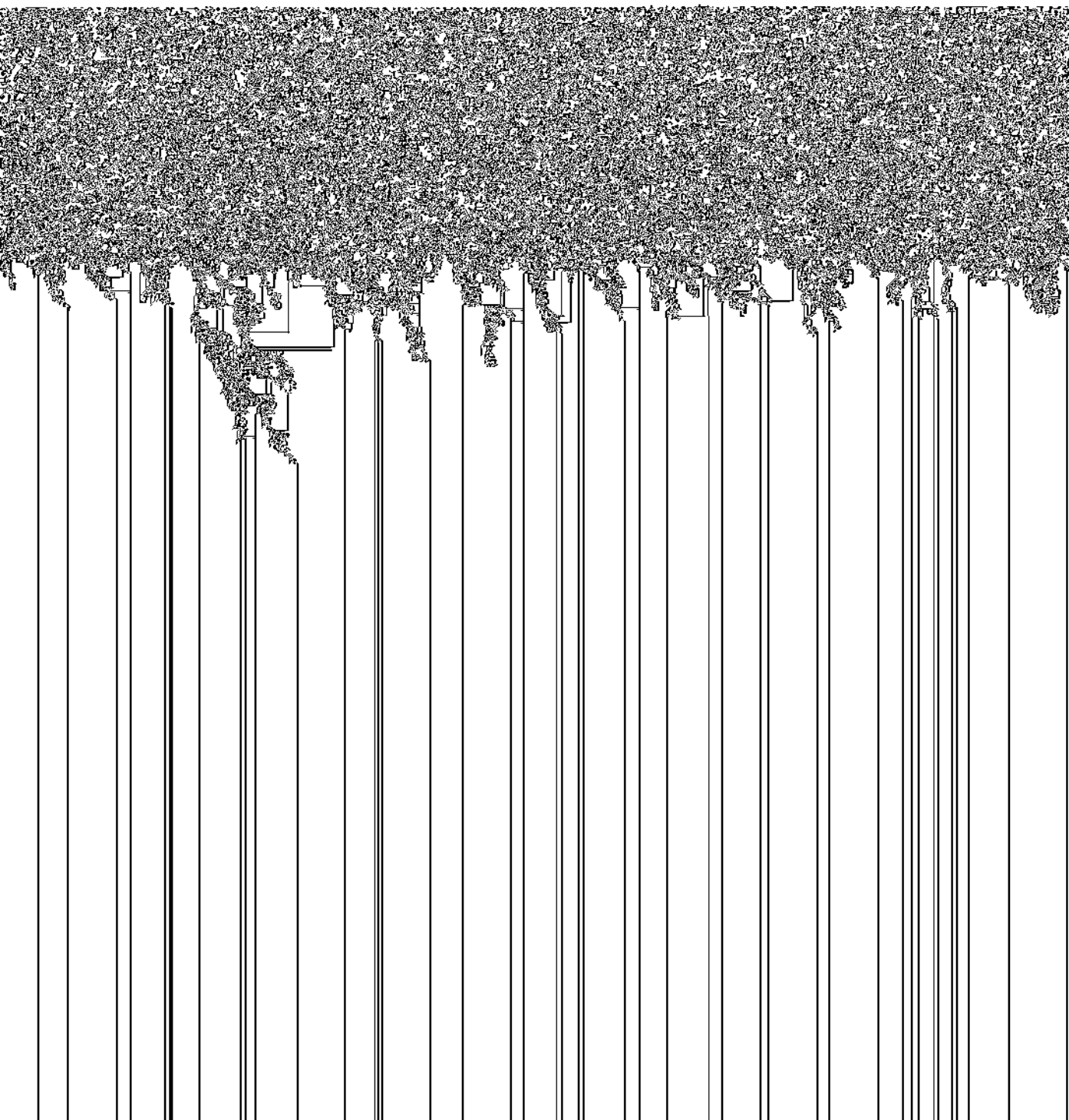
第三节 应用技术..... 180

一、热重分析..... 180

二、国产分光光度计的使用与维护.....	197	三、仪器的维护.....	227
第二章 发射光谱仪.....	200	第五章 气体分析仪器.....	228
第一节 概述.....	200	第一节 红外碳硫测定仪.....	228
第二节 分类及特点.....	200	一、用途.....	228
一、仪器结构部件的分类及特点.....	200	二、工作原理.....	228
二、仪器的分类及特点.....	206	三、仪器的结构与作用.....	228
第三节 仪器的使用与维护.....	206	四、仪器的分类及其主要技术指标.....	229
一、日常使用与维护通则.....	206	五、仪器的使用与维护.....	229
二、Z503B型光中直接光谱仪的使用.....		第二节 热导式氮氢氮测定仪.....	234



第二节 温度试验设备.....	264	第四节 防护试验设备.....	296
一、高温试验箱.....	264	一、砂尘试验设备.....	296
二、低温试验箱.....	265	二、雨淋试验设备.....	297
三、高低温试验箱.....	267	第五章 实验室离心机.....	299
四、培养箱.....	268	一、实验室离心机概述.....	299
第三章 气候环境试验设备.....	271	二、实验室离心机的定义和分类.....	299
第一节 湿热试验设备.....	271	三、实验室离心机的应用.....	299
一、恒定湿热试验设备.....	271	四、低速离心机.....	299





第三节 取样示波器.....	412	二、逻辑分析仪的工作原理.....	433
一、取样示波器的特点.....	412	三、逻辑分析仪的使用.....	435
二、取样技术.....	413	四、SL256型逻辑示波器.....	436
三、取样示波器结构原理.....	414	五、逻辑分析仪的选型.....	439
四、取样示波器的选型.....	414	第三节 频率特性测试仪.....	441
第四节 存储示波器.....	415	一、特点和用途.....	441
一、存储示波器的特点.....	415	二、模拟式频率特性测试仪的工作原	
二、模拟存储示波器.....	415	理.....	441
三、数字存储示波器.....	417	三、BT-3型频率特性测试仪.....	443
四、存储示波器的选型.....	419	四、数字式频率特性测试仪的工作原	
第五节 晶体管特性图示仪.....	419	理.....	445
一、特点和基本工作原理.....	419	五、1172型超低频频响分析仪.....	445
二、JT-1型晶体管特性图示仪.....	422	六、1250型频率响应分析仪.....	447
三、晶体管特性图示仪的选型.....	423	七、1191频率响应分析系统.....	448
第六章 信号分析和网络测试仪器.....	425	八、频率特性测试仪的选型.....	448
第一节 频谱分析仪.....	425	第四节 FFT 算法综合测试仪.....	450
一、概述.....	425	一、特点、分类和用途.....	450
二、模拟式频谱分析仪.....	425	二、测量理论基础概述.....	450
三、数字式频谱分析仪.....	429	三、7T08型信号分析仪.....	451
四、频谱分析仪的使用.....	430	四、HP5423A 结构动态分析仪.....	453
五、频谱分析仪的选型.....	433	五、综合测试仪使用注意事项.....	456
第二节 逻辑分析仪.....	433	六、综合测试仪的选型.....	457
一、逻辑分析仪的特点.....	433	参考文献.....	457

## 第六篇 振动与噪声仪器

第一章 振动测试仪器检定与校准.....	459	第五节 振动台的检定与校准.....	467
第一节 振动测试概述.....	459	一、校准振动台.....	467
一、振动的类型及其测试的基本内容.....	459	二、机械式振动试验台.....	469
二、常用振动试验系统.....	460	三、电动式振动试验台.....	470
三、振动允许值.....	461	第二章 测振仪器的选用与维修.....	472
第二节 测振仪器的检定内容和方法.....	461	第一节 测振传感器的使用及常见故障	
一、通常情况下测振仪器的检定和校准.....	461	处理.....	472
二、基本检定内容.....	461	一、测振传感器的分类与适用范围.....	472
三、常用检定方法.....	462	二、测振传感器的安装与固定.....	472
四、测振仪器的分部标定与系统标定.....	462	三、测振传感器的使用、维护及注意	
第三节 振动传感器的检定与校准.....	463	事项.....	473
一、标准传感器.....	463	四、测振传感器常见故障及其处理.....	475
二、压电加速度计.....	463	第二节 测振放大器的使用及注意事项.....	475
三、力传感器.....	464	一、微积分放大器和载波放大器.....	475
第四节 测振仪器的检定与校准.....	465	二、电压放大器与电荷放大器.....	476
一、电荷放大器.....	465	三、测振放大器常见故障及其处理.....	476
二、测振仪.....	466	第三节 测振仪器的合理选用及配套.....	477
		一、测振系统的合理选配.....	477

二、现场测量中应考虑的若干问题·····	477	第五章 应用微处理机分析振动信	
第四节 常用记录器的使用与维护·····	478	号·····	509
一、记录器分类与适用范围·····	478	第一节 数据转换器的性能及选用·····	509
二、常用记录器的使用与注意事项·····	478	一、数据转换器的特性与分析信号的	
三、记录器常见故障及其处理·····	480	关系·····	506
第三章 激振设备与环境振动试验·····	482	二、数据转换器的特性与价格的关系·····	509
第一节 机械式振动台与激振器·····	482	三、如何选配微处理机的数据转换器·····	510
一、离心式机械振动台与激振器·····	482	第二节 信号处理技术在振动分析中的	
二、机械式振动台主要工作特性·····	483	应用·····	511
三、机械振动台的优缺点·····	484	一、利用数字计算对振动信号预处理·····	511
第二节 电动式振动台和激振器·····	484	二、利用快速傅里叶变换进行振动信	
一、电动式振动台的结构及特点·····	484	号的相关分析和谱分析·····	512
二、主要工作特性·····	484	三、利用参数识别方法分析结构固有	
三、激振器·····	488	特征·····	512
第三节 电液式振动台·····	492	四、机械设备的故障诊断及特征分析·····	513
一、结构形式及特点·····	492	第三节 常用振动分析软件介绍·····	514
二、主要工作特性·····	492	一、数字信号处理程序库·····	514
第四节 振动台的安装和维护保养·····	494	二、振动数字信号处理程序库·····	515
一、振动台的安装·····	494	三、模态分析软件包·····	515
二、振动台的维护保养·····	494	第六章 噪声仪器的选用与维护·····	516
第五节 环境振动试验·····	494	第一节 噪声测试系统及其选用·····	516
一、环境振动试验标准·····	494	一、基本测量系统·····	516
二、环境振动试验方法·····	495	二、便携式测量仪器·····	516

三、用噪声评价数 $N$ 表示的噪声标准.....	528	参考文献.....	539
---------------------------	-----	-----------	-----

## 第七篇 动力机械测试仪器

<b>第一章 扭矩仪</b> .....	531	二、主要技术参数.....	557
<b>第一节 扭矩测量仪器</b> .....	531	三、使用与保养.....	558
一、扭矩及扭矩测量原理.....	531	四、可动闸套式水力测功器.....	559
二、扭矩仪的类型与特点.....	532	<b>第三节 直流电力测功器</b> .....	560
三、扭矩仪的选择与使用范围.....	532	一、结构与工作原理.....	560
四、扭矩仪的标定与校准.....	535	二、类型与特性.....	561
<b>第二节 应变式扭矩仪</b> .....	536	三、使用与维护.....	562
一、工作原理.....	536	<b>第四节 电涡流测功器</b> .....	564
二、应变式扭矩传感器.....	537	一、电涡流测功器的工作原理.....	564
三、集流环及其使用.....	538	二、电涡流测功器系列及其技术参数.....	564
<b>第三节 相位扭矩测量仪</b> .....	540	三、电涡流测功器的安装.....	564
一、相位差式扭矩传感器工作原理.....	540	四、电涡流测功器的维护.....	567
二、相位数字扭矩测量仪.....	541	<b>第五节 电力测功仪</b> .....	567
三、数字扭矩仪的使用与维护.....	542	一、性能及参数.....	567
四、常见故障及维修.....	544	二、测功仪的使用与维护.....	568
<b>第二章 转速仪</b> .....	545	<b>第四章 油耗仪</b> .....	569
<b>第一节 概述</b> .....	545	<b>第一节 油耗测量装置</b> .....	569
一、转速仪的类型与特点.....	545	一、燃油消耗量及其测量.....	569
二、转速仪的选择.....	545	二、油耗测量装置的类型与特点.....	569
三、转速仪的检定.....	545	三、油耗仪的选择与使用范围.....	569
<b>第二节 离心式转速表</b> .....	546	四、油耗仪的标定.....	569
一、工作原理.....	546	<b>第二节 容积式油耗仪</b> .....	570
二、国产离心式转速表的类型及特性.....	547	一、容积式油耗仪.....	570
三、使用与维护.....	547	二、油耗仪使用.....	571
<b>第三节 数字式转速表</b> .....	548	<b>第三节 数字式油耗自动测量仪</b> .....	571
一、数字式转速表的类型及特点.....	548	一、重量式油耗仪.....	572
二、测速传感器.....	548	二、YHCS-1型的使用与维护.....	572
三、使用注意事项.....	549	三、SYZZ型数字式油耗转速自动 测量仪.....	574
<b>第四节 频闪式测速仪</b> .....	551	<b>第五章 发动机台架试验装置</b> .....	577
一、频闪测速原理.....	551	<b>第一节 机械效率测量仪</b> .....	577
二、频闪测速的特点.....	552	一、机械效率测定方法.....	577
三、使用与维护.....	552	二、特点与主要性能.....	578
<b>第三章 测功器</b> .....	555	三、使用与维护.....	578
<b>第一节 轴功率测定装置</b> .....	555	<b>第二节 气电示功器</b> .....	579
一、轴功率及其测量原理.....	555	一、气电示功器工作原理.....	579
二、轴功率测定装置的类型与特点.....	555	二、使用与维护注意事项.....	579
三、测功器的选择与使用范围.....	556	<b>第三节 数字电子示功仪</b> .....	580
<b>第二节 水力测功器</b> .....	556	一、结构及工作原理.....	580
一、概述.....	556		



二、使用与维护.....	587	第五节 工况监测与台架自动测功装置.....	583
第四章 综合测试分析仪.....	593	台架自动测功装置.....	583



# XV

一、概述.....	666	二、料位测定仪.....	705
二、SHN型碾轮式混砂机 .....	668	三、温度测定仪.....	707
三、SHQ-30型碾轮式混砂机 .....	667	四、灰黄成分测定仪 .....	709

术性能.....	783	参考文献 .....	784
四、涡流检测仪器的使用和维护.....	783		

### 第十一篇 力学实验仪器及试验机

第一章 拉压试验机 .....	785	一、主要技术要求.....	792
第一节 拉压试验机的类型.....	785	二、主要检定内容及检定方法.....	793
一、材料试验机分类.....	785	第三章 扭转试验机和疲劳试验机 .....	795
二、拉力试验机的类型.....	785	第一节 扭转试验机.....	795
三、压力试验机的类型.....	785	一、扭转试验机的用途和类型.....	795
四、万能试验机的类型.....	786	二、NJ-50B型扭转试验机 .....	795
第二节 试验机的维护与保养.....	786	第二节 疲劳试验机.....	796

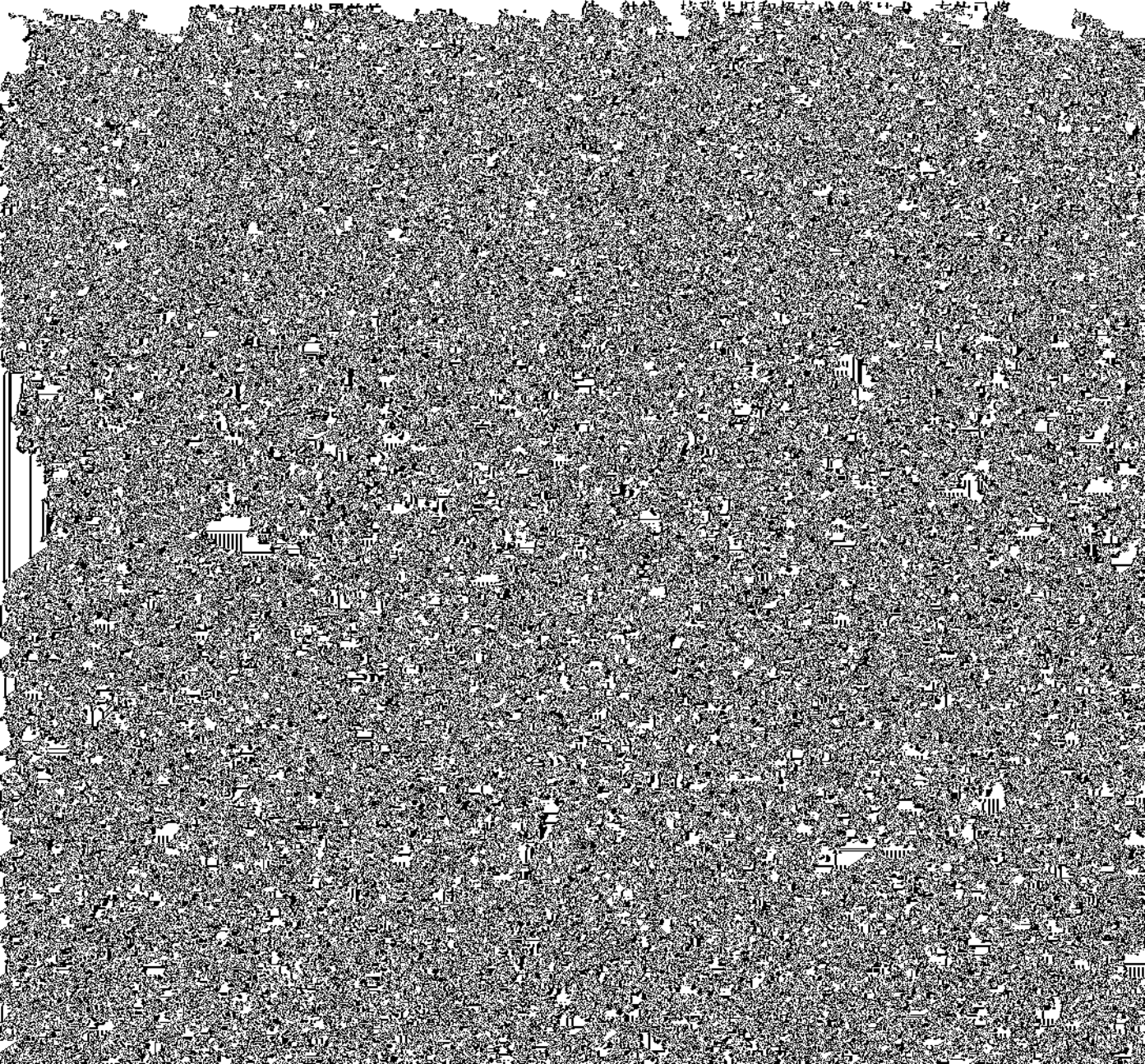


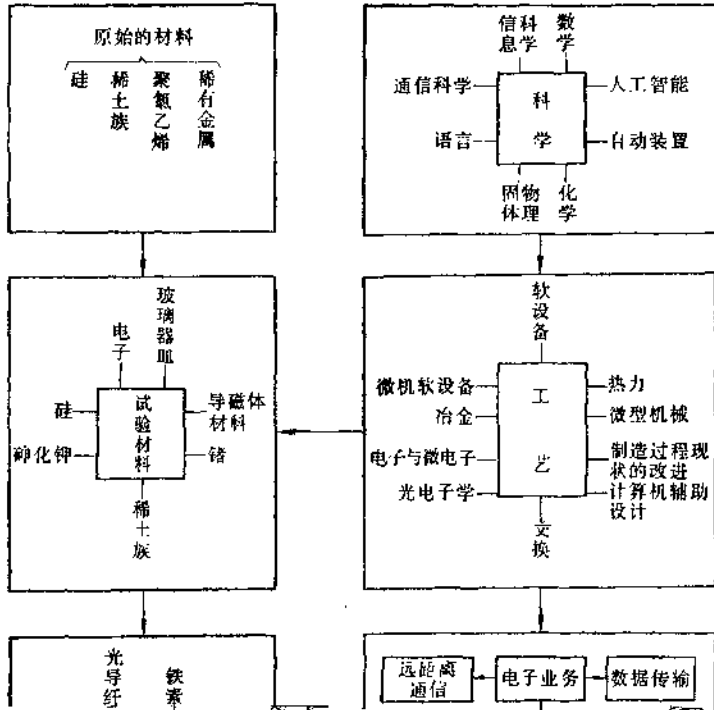
# 第一篇 基础篇

## 第一章 实验室仪器的分类及作用

### 第一节 实验室仪器的特点与分类

工业发达国家大力开发检测技术与传感器新技术，开发和应用半导体敏感元件、光导纤维敏感元件、热敏、核磁共振和极化电荷等元件，它们可将







5. 检测仪表、传感器的品种系列正在向多样化、成套化发展。

随着生产规模的不断扩大, 生产连续性的不断加强, 大规模成套设备不断增加。“八五”期间机电仪一体化产品将是重要的发展趋势。

## 二、实验室仪器和其他科学仪器的定义

目前对实验室仪器有很多种定义, 但都不很明确。由于人们的认识不同, 不同的国家和组织以及厂商和用户的看法也不尽相同, 因而给出的定义有所差异。

根据我国仪器仪表的生产类别以及参考国外有关仪器仪表的分类, 以下将逐一阐述通常所用仪表的分类及其定义。

### 1. 测量仪器

测量仪器即是为最后目的或者为中间过程而对物理的、化学的或生物学的变量进行测量所用的全部仪器。

### 2. 分析仪器

分析仪器是测量仪器的一部分, 包括测量仪器所需的数据系统。这部分测量仪器专门用来分析物质的分子结构和物质成分。根据这一定义方法, 分析仪器就不包括以下那些用于其他目的仪器。例如, 光学显微镜、分析秤、示波器、离心机和其他一些为分析做准备的仪器。过程控制仪器不包括在仪器内部的数据处理设备, 例如, 计算机及其外围设备。

### 3. 实验室仪器

实验室仪器包括了所有的分析仪器及前述装置, 但除去单独购买的数据处理设备。

### 4. 科学仪器

包括前述实验室仪器以及其他一些大设备。例如, 粒子加速器和基于相同工作原理而在其他领域里(医学、生物学)应用的仪器。

为了给各领域所用仪器下一个较为精确的定义, 各领域的仪器范围如图1-1-2所示。科学仪器包括了四大类: 测量仪器、分析仪器、实验室仪器以及医疗生物仪器。圆圈中包括的面积表示它们在市场应用的比例和数量以及它们的重要性, 也近似地说明我国仪器使用的数量。

## 三、实验室仪器的分类

根据国外有关技术资料分析, 可把实验室仪器分成七大类。

### (一) 光学仪器

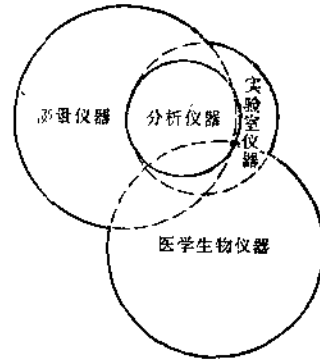


图1-1-2 各类仪器的定义范围

1. 光学显微镜和部件
  2. 双筒望远镜和天文望远镜
  3. 用于大地测量的地形描述、摄影测量的光学测量和测试装置
  4. 用于分析和控制的光学器件
  5. 镀膜、光栅光学元件
  6. 在该领域内的其他各式各样的仪器设备
- (二) 光电仪器
1. 发射光谱仪、Raman 光谱仪和火焰光学计
  2. 吸收光谱仪(颜色计和谱颜色仪器)。
  3. 光源和激光器
  4. 在这领域内的其他设备
- (三) 用于物理、化学或者生物分析的通用的实验室仪器
1. 特殊分析仪器
  2. 色谱学(气体、液体、薄膜和纸)和 Aminoacids 分析仪器
  3. 电化学装置
  4. 热分析仪器
  5. 在这一领域内的其他仪器
- (四) X 射线分析仪器以及原子核、粒子加速器和谐振式谱分析仪
1. 原子核分析仪器
  2. 微表面分析仪器
  3. 质谱仪
  4. 电子显微镜
  5. X 射线分析仪器, 包括应用于工业、医学和研究等不同领域的 X 射线仪器
  6. 核磁共振谱分析仪器、电子自旋谱分析仪器
  7. 真空计和漏泄探测装置
  8. 粒子加速器

### 9. 在这领域内的其他设备

#### (五) 基于其他工作原理的仪器

1. 超声系统
2. 各式各样的设备

#### (六) 用于电子测量和记录的通用实验室仪器

1. 示波器
2. 信号分析仪器
3. 记录仪器
4. 各式各样的设备

#### (七) 为分析做准备的设备和测试仪器

1. 真空泵和其他类型仪器
2. 离心机和超速离心机

#### 3. 各式各样的实验室设备, 诸如烘箱, 炉, 反

### 4. 70年代中期至今

实验室经过恢复、整顿、充实、提高进入了新的发展阶段。实验室的重要地位也受到了普遍的承认和重视。国家对实验室的投资也有了较大的增加, 健全了管理机构, 发展壮大实验室技术队伍, 一批具有国际先进水平的精密仪器以及电子计算机引进实验室, 使实验室面貌发生了很大的变化。实验室体制也正处在变革之中, 全国相继成立了不少分析测试中心, 还建立了若干对国内外开放的国家级学科重点实验室。

从上述发展过程来看, 目前实验室已发展成为一个大规模的复杂系统。采用过去那种将一个事物分解成许多孤立的部分, 来分别研究的传统的管理

第一流的科学实验室，没有先进的科学仪器武装实验室，就很难不断造就出这样的第一流的科技人才和不断创造出第一流的科技成果。

我们以仪器仪表对农村经济发展所起的积极作用为例，简述仪器仪表在四化建设中的作用。

湖北省襄阳县农业技术推广站于1982年开展了





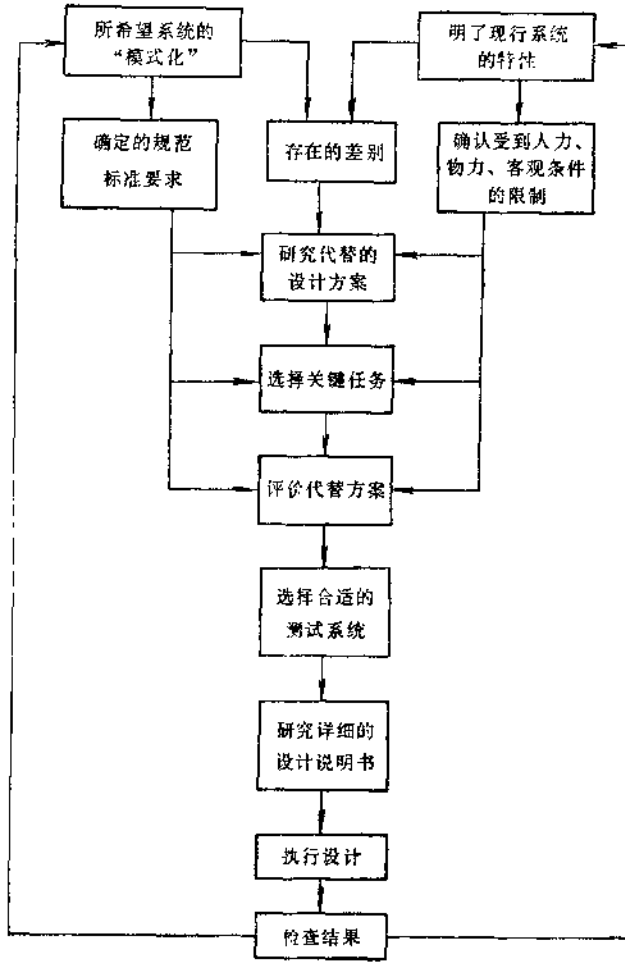


图1-1-3 测试系统设计程序

后，就要认真地制定正确、合理的测量系统和选用与测量参数相适应的仪器设备。防止由于测量仪器

同，细节也会有所不同。表1-1-3表示出功能分配的一般原则。功能分配时，还应注意到人的功能在全

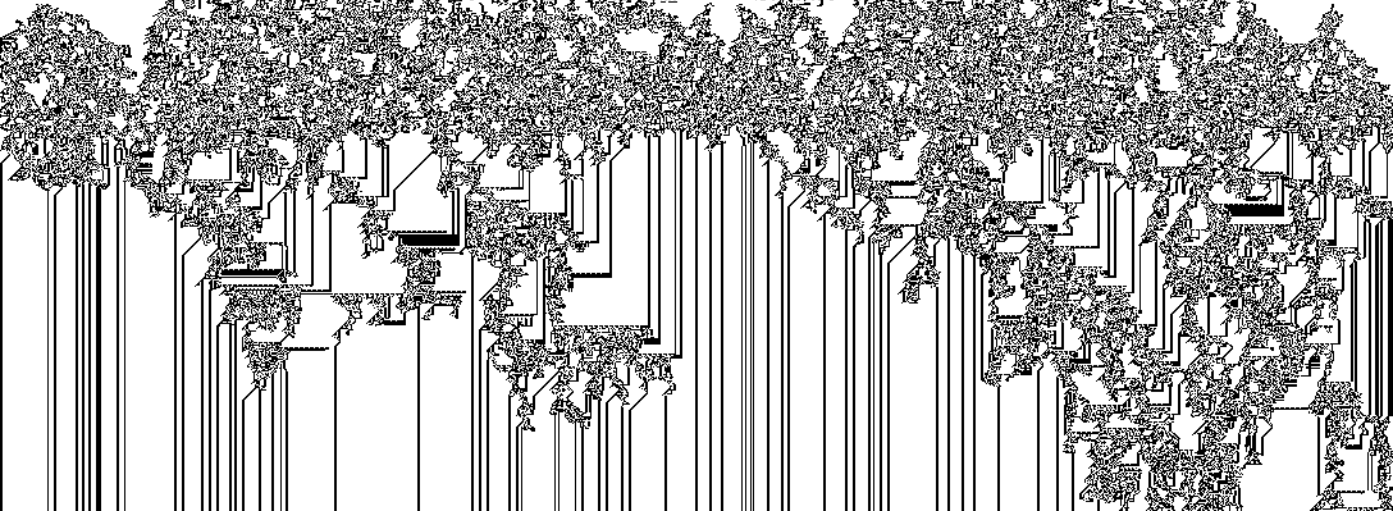




表1-1-1 系统研制各阶段中人的作用

项目 阶段	各级段中工作内容	工程师的任务	人体工程学家的任务	必要的种类
系统计划	系统目标, 系统功能, 系统必要条件, 环境条件	作业能力上的必要事项, 系统及子系统的必要条件	用户要求的条件, 系统及子系统要求的条件	功能、行动信息流的分析等
系统设计	详细的系统功能、可靠性、维护性、成本、外观	详细的规格装置设计	人的各种要求事项, 为维护操作的各种设备, 操作面板的事项, 工作空间的规划	人的功能的数据, 输入与输出的关系显示, 控制机器的种类等人体行动数据
系统的具体化	制造上的要求, 设置上的要求, 人员条件及保证, 人员的训练与培养, 市场开发	程序制定, 装置制造, 装置的评价, 装置的修正	操作程序, 系统人员的选择, 人员的评价及人员的子系统	指示介绍书及编制便览

表1-1-2 机械特征和人的特征

(续)

名称	机	器	人	名称	机	器	人
序号				序号			
1. 检测	物理量检测范围广泛且正确, 对于人不能检测的电磁波		只有认识和直接感觉的能力, 但没有一定的标准值, 而且在	6. 效率	若具有复杂功能时, 往往效率增加, 而且必须有大的功		需要吃饭等 一个人作为一个单

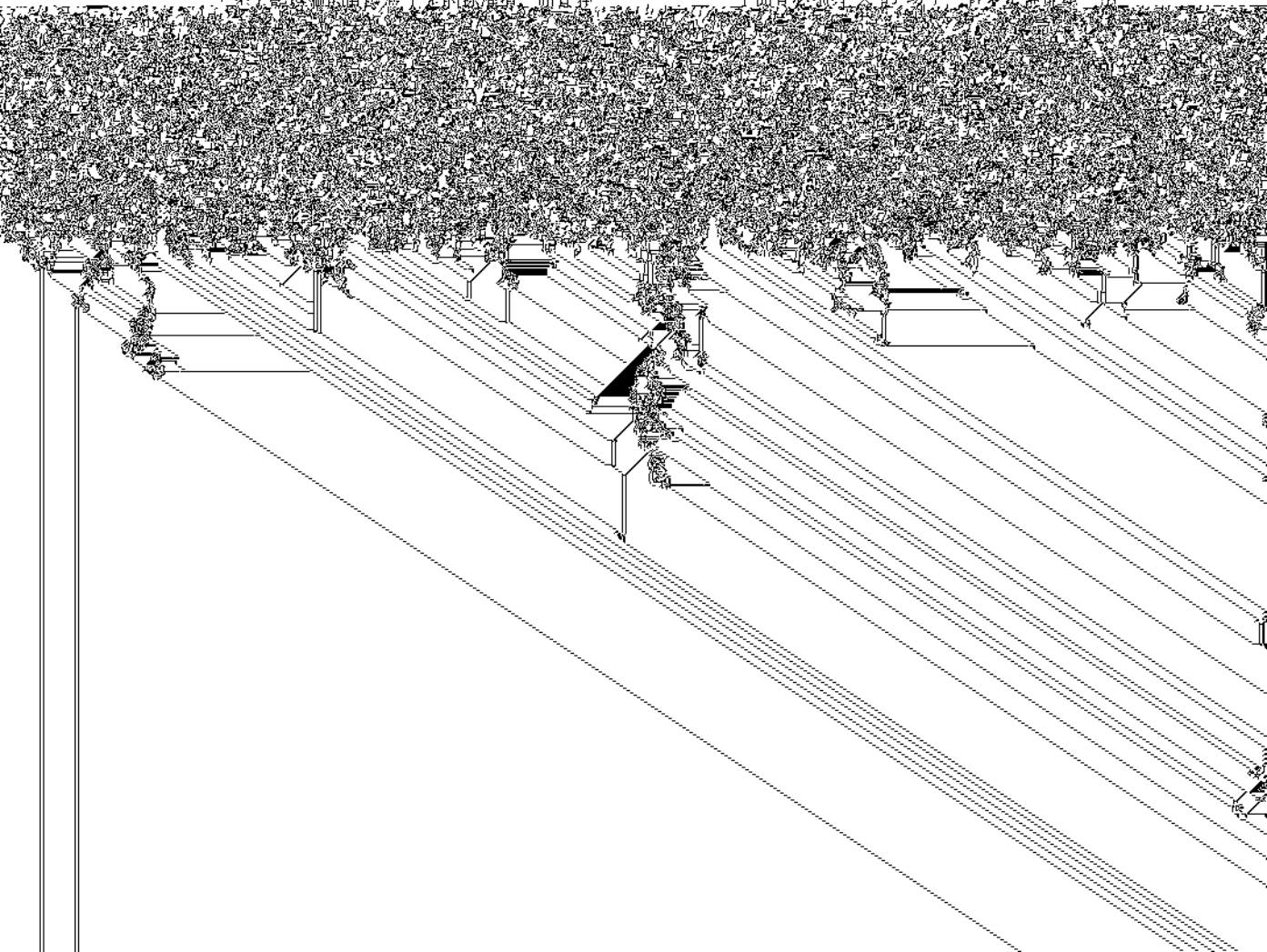


表 1-1-7 对数分度的一般原则

### 3. 系统的可靠性

一般的测试系统均是由测试仪器、设备、机械和操作它们的人构成。在系统工作过程中无论是人还是仪器设备等都会出现意想不到的故障,使系统出现不同程度的事故。因此在设计一个测量系统时,就应当尽量不使系统发生故障,即使发生故障也要使系统尽快恢复工作。为此就应当根据测试仪器设备、硬件、软件和人等的特性和测试系统的规模,确定适当的可靠性要求方案。可靠性要求方案主要由下面三个要求组成。

(1) 故障分析 分析测试系统中可能出现的故障并分析研究其故障对测试系统的影响

电磁干扰能力,又能抗仪器设备之间相互连接产生的内部电及电磁的干扰。抑制干扰的方法,可采用抑制干扰源、改善耦合通道,屏蔽对于干扰敏感的仪器及部件。

为了提高操作的可靠性与维修性,提高人和机器在系统中的性能,把人的因素与安全性、可靠性、维修性以及系统的其他一些特性综合考虑是很必要的。由于测试系统的复杂程度越来越高,因而要求使用设备的人所接受和处理的信息与操作的精细程度会超出正常人能力的极限。解决的方法除了要求对人经过训练之外,同时也要求仪器设备、计算机等适应人的功能



指精度、准确度的保持性、零件的耐用性，安全可靠性等。

### 3. 节能性

指合理利用能源及减少能耗。

### 4. 维修性

或叫可修性或易修性。维修性影响仪器设备的维护、修理的工作量和费用。维修性好的仪器设备，一般是指结构简单、零部件组合合理。可速拆卸、易于检查、实现通用化、标准化、零件互换性能强等。通常设备越精密，维护和修理的难度越大，对维护修理的专门知识和技术以及所需的备品备件的材料要求也越高。因此，在选择仪器设备时要考虑到有关资料、技术、工具及备品、备件的可能性和持续时间，对进口设备更为重要。

### 5. 环保性

仪器设备的噪声和排放有害物质，对环境的污染已成公害，在选择时，噪声及有害物质排放要符合国家标准，或者采取相应的防护措施。

### 6. 耐用性

使用过程中，自然寿命要长。

### 7. 成套性

指性能和能力的配套性。如果不配套，则不能发挥作用而造成很大浪费。

### 8. 灵活性

要求操作灵活方便，通用性强，结构紧凑而体积小。

## (二) 设备的安装验收

新购置的仪器设备，特别是引进的仪器设备，一定要把好验收关。通过验收，可把种种隐患消除在投入使用前，确保今后仪器能稳定运行。

根据技术资料必须严格检查验收各项技术指标做好充分准备工作，如人员培训、组织落实等；在验收不合格的条件下及时退货及办理索赔手续。

## (三) 仪器设备的正确使用

正确合理地使用仪器设备要作到以下几点：

度、操作规程、事故处理制度，对大型精密仪器设备要建立技术维修和使用档案。

## (四) 仪器设备的维护与保养

维护保养与修理是使用过程中的客观要求。设备维护保养工作的主要内容是：清洁、润滑、防腐、检查零部件的完整以及对仪器仪表的通电防潮等。通过对仪器修理和更换零件，使仪器设备性能得到恢复。仪器的修理特别重要，特别是到了“晚年”期，修理工作更为重要。仪器设备的修理工作必须坚持以预防为主的原则，群众维修和专业维修相结合的原则，勤俭节约、讲求经济效益的原则。

目前国内修理工作分为四种：

### 1. 事故维修

这种维修是不坏不修，被动应付，损失大，难以保证维修质量。

### 2. 计划、预防维修

这是以预防为主，计划性比较强的维修。我国工业企业从60年代开始就普遍实行这种维修制度，它包括日常维修、维护、定期检查、计划修理。

### 3. 改造维修

是以减少故障重复、降低保养费用、提高效率为目的，对设备的结构进行改进和维修。

### 4. 维修预防

由于科学技术的发展，监测技术发展很快，对一些仪器设备故障进行监测，作出科学的预防。

设备修理与维护保养两者缺一不可，维护保养工作做得好，延长了设备寿命，就可延长修理周期，减少修理工作量。

## (五) 仪器设备的改造、更新与报废

### 1. 仪器设备的技术改造

把科学技术的最新成果应用于现有的仪器设备，改变现有仪器设备的面貌，以提高仪器设备的现代化水平。仪器设备的更新是以比较先进的仪器设备来替换不能继续使用或陈旧的仪器设备。对原有设备进行技术改造，是加速实验手段现代化的重

(2)对仪器设备提出报废的依据

(3)对仪器设备技术改进提出经济论证的依据。

## 五、实验室技术队伍的建设

### (一)建设技术队伍的重要性

在实验室系统的各项要素中,人是起决定作用的要素。必须依靠人的创造性劳动,将物的能量和效益充分发挥出来。

当代科学技术迅速发展,电子技术、电视技术、自动控制、信息处理技术等渗透到各个实验领域。在一些通用机械、动力机械设备上装置传感器和二次仪表,使这些设备的功能和精度等级大大提高。在电子技术方面,经历过电子管、晶体管、集成电路和大规模集成电路几个阶段。目前正在酝酿新一代光能和智能电子计算机。在机械装置和动力试验装置方面,现在已走向模拟化、小型化、可视化。从近几年国外发展概况看有以下几点:

#### 1.智力密集型

目前仪器设备都是多种学科最新科技成果的综合运用,体现的科学技术门类越来越多,成为智力密集型仪器设备。

#### 2.为多学科服务

目前的仪器设备都是多功能和高度自动化的现代化设备,潜在能力很大,可为多学科服务。

#### 3.综合性强

大多均装有电脑及自动控制装置,形成声、光、机、电的综合体。

#### 4.硬软件结合

不仅硬件结构复杂,而且有大量适应各种用途的软件和功能,必须由实验技术人员去消化开发。

综上所述,对管理和使用以及维护人员提出较高的要求,需要试验人员除了要有本专业的牢固知识外,还要有一定宽度的知识面,如应具有近代物理、电子技术和计算机等方面的知识。

### (二)实验室技术人员的编制与结构

由于科研任务、技术开发和研制任务增加,实验中心和技术服务任务不断扩大等,为此要求实验室技术人员要定编制,人员的组成中,大学、大专、中专学历结构应定比例,这是保证实验室工作顺利进展的不可缺少的条件。

### (三)实验技术人员的职业道德

所谓职业道德,就是从事一定职业活动中所应遵循的道德规范的综合。特定的职业不但要求人们

必须具备特定的知识技能,而且必须具备特定的品质。

#### 1.职业特征

由于实验室工作任务的多样化,除有脑力劳动外,还有体力劳动。从事科学研究时,其工作本身具有明显的继承性和创造性,尤其是目前科学知识扩大和知识积累量增加,知识更新换代特别快,为此要求试验人员要付出更大的心血和代价,刻苦学习,才能取得成功。

由于实验室工作的协调性和成果的群体性,创造了实验室工作人员的集体主义思想和同志间的团结友爱的基础。

由于实验室工作的多样化、继承性和创造性的特点,决定了它是一种艰苦的劳动。根据其工作特征,经过长期的职业劳动,人们提炼总结形成了实验室工作人员的职业道德规范。

#### 2.道德规范

职业道德规范是从业人员从事职业活动的守则,是衡量从业人员道德行为和品行的标准。它可归纳为以身作则、作风严谨、实事求是、勤俭节约、艰苦奋斗、刻苦钻研、精益求精、互相尊重、密切合作等。

#### 3.职业道德的培养

必须对从事实验室工作的人员进行教育,使他们充分认识到实验室工作的重要性,树立献身实验室工作的决心,勤勤恳恳、兢兢业业地进行科研工作。

#### (四)培养与考核

主要应抓两点,首先是通过科研实践提高实验技术水平,其次是组织专门的技术培训。由于通过实验技能和测试技术的训练能培养出观察事物、处理实验数据、分析和解决实际问题的能力,所以通过科研试验活动的实践是培养试验技术人员的基本手段。在实践中,要求实验技术人员能比较熟悉地掌握有关仪器设备的性能、调试和维修技术等。除了上述在实践中培养与训练之外,还应当针对大型精密产品实行短期培训班,使他们熟悉仪器的功能、掌握操作规程及实验数据处理方法等,以求得对仪器的正确使用,所得数据准确可靠。

为了加强对实验室工作人员的培养与合理使用,充分发挥他们为社会主义服务的创造性和积极性,要进行定期的考核,贯彻各尽所能、按劳分配的原则。





术要求进行严格的验收,不合格的产品应当及时地要求对外索赔。

### 3. 使用与开发

正确合理地使用设备应当注意以下几方面,例如,配备专职操作人员。根据仪器结构特征,安排工作任务和工作负荷。为仪器设备创造适宜环境以及建立一套合理的使用规章制度等。

只有正确地使用仪器设备,才能创造价值,才能把握住设备管理的重要阶段,才能使仪器设备发挥出更大的作用。

### 4. 仪器设备的维护保养与修理

维护、保养与修理是设备在使用过程中的客观

内容。其管理范围有以下几方面。

#### (一) 实验物质的范围和分类

实验物质常划为固定资产、低值品、易耗品和材料四大类。后三项属实验物质管理范围之内。

#### (二) 物质的购置和仓库管理

##### 1. 实验物质的购置

实验物质的计划管理,要考虑申请物质的程序、统配部门物质的订货、市场供应和采购等。在实验物质入库前要进行认真验收,办理入库手续。

##### 2. 仓库管理

库房管理主要由库房设置、码垛、上架、维护保养、出库发放、盘点核对和帐务处理等组成。





合上或拉下。

3) 注意电线的干燥度，遵守使用仪器的操作规

择仪器，正确地协调各测试仪器的精度，使之相互  
之间互相匹配，以何获得高精度和可靠性。首先理

$$= b_m \frac{d^m x}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x \quad (1-2-1)$$

及其初始条件:  $\frac{d^i y}{dt^i} (i=0, \dots, n-1)$  在  $t=0$  点的值, 来描述系统的特性, 在经典力学和经典控制论中都起着重要作用。

如果微分方程(1-2-1)的系数  $a_i, b_j$  都不是  $x, y$  及它们的导数的函数, 则称它为线性的。如果  $a_i, b_j$  是常数, 则称它为线性时不变的。这种线性时不变的情况在数学上是容易处理的。如果这些系数  $a_i, b_j$  是时间  $t$  的函数, 就称为线性时变模型。反之, 如果  $a_i, b_j$  中至少有一个系数依赖于  $x, y$  或它们的导数, 则称这个模型是非线性的。

描述系统的方法很多, 可采用各种形式的数学模型。但是线性、非线性这一特征是由系统的本身特征所决定, 并不随系统的表示方法而改变, 它们的根本区别在于线性系统服从“叠加原理”, 而非线性系统不满足“叠加原理”。

叠加原理: 如果输入  $x_1(t)$  时的输出为  $y_1(t)$ , 输入  $x_2(t)$  时的输出为  $y_2(t)$ , 则有输入为  $\alpha x_1(t) + \beta x_2(t)$  时, 其输出为  $\alpha y_1(t) + \beta y_2(t)$ 。

对于非线性系统, 叠加原理不仅对于输入信号所

根据测量任务的不同要求, 设计测量系统并选用与之匹配的测试设备与仪表, 进而达到测量的目的。

系统是由许多成分(组成系统的部分称为成分)组成的, 每个成分与其它成分无关。成分本身一般也不是一个单一的部件, 可以把成分做为一个系统来处理, 并可分解为更简单的部件。

对于一个动态的测试系统与静态的测试系统要求不同, 这里仅对动态测试系统做详细分析。

#### (一) 系统的动特性及其技术指标

系统的动特性一般分为两类, 一类是时域的性能指标; 另一类是频率域的性能指标。

##### 1. 系统的时域响应及时域指标

衡量技术指标常用阶跃响应及其品质指标、回零过渡过程与阶跃响应的关系、方波响应与阶跃响应的关系、脉冲响应与阶跃响应的关系等几项指标为准。

(1) 阶跃响应及其品质指标 突然加常力于传感器上时, 传感器的输入  $x(t)$  是一阶跃函数, 对应的阶跃响应用  $c(t)$  表示, 如图1-2-1所示输入与输出的关系。  $x(t)$  为输入的时间函数,  $X(s)$  为相应的拉氏变换,  $y(t)$  为输出的时间函数,  $Y(s)$  为相应的拉氏变换, 并有:



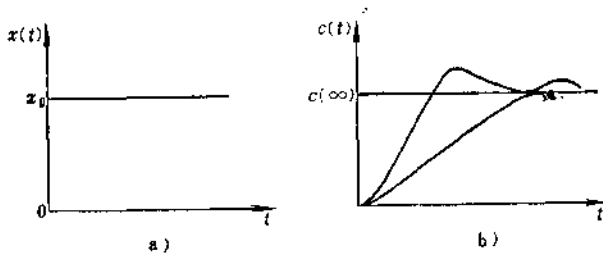


图1-2-2 阶跃函数及其响应

a)阶跃函数 b)阶跃响应

$$x(t) = x_0 \times 1(t) = \begin{cases} x_0, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases} \quad (1-2-3)$$

如果将  $x_0$  作为一个单位, 则  $x(t)$  称为单位阶跃函数, 表示为

$$x(t) = 1(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases} \quad (1-2-4)$$

图1-2-2b 曲线为其系统为线性和近似线性时的阶跃响应。其中有衰减振荡类型的, 也有非周期类型的, 通常以衰减类型的  $c(t)$  曲线定义时延为半所需

半所需时间, 叫延迟时间。

2) 上升时间  $t_d$  响应曲线从稳态值的 10% 上升到 90% 或从稳态值的 5% 上升到 95%, 或从零上升到稳态值所需的时间。

3) 峰值时间  $t_p$  响应曲线达到超调量的第一个峰值所需的时间, 叫做峰值时间。

4) 最大超调量  $\sigma$  定义如下:

$$\sigma = \frac{c(t)_{\max} - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

5) 调整时间  $t_s$  在响应曲线上, 用稳态值的百分数 (通常取 5% 或 2%) 作为一个允许误差范围, 响应曲线达到并永远保持在这一允许误差范围内所需的时间, 叫做调整时间。

(2) 回零过渡过程与阶跃响应的关系 对于作用一个常值力的传感器, 传感器处于稳态, 系统输出为常值。此时如果突然将力卸去, 则传感器的输出将由常值变为零, 称输出这种状态为回零过渡过程, 用  $l(t)$  表示。对于同一个系统, 其阶跃响应与回零过渡过程  $l(t)$  之间的关系为



$I(t)$  $t_0$ 

$$y_1(t) = y(t) + y_1(t - t_0) \quad (1-2-10)$$

如果系统在测量过程中得到了系统的初始值

$$c(t) = \int_0^{\infty} g(t) dt = 1 \quad (1-2-12)$$

从上图看出利用作图法和理论计算出的曲线非常接近。

2. 系统的频域特性及技术指标

系统频率特性定义：系统输出  $y(t)$  的傅氏变换  $Y(j\omega)$  与系统输入  $x(t)$  的富氏变换  $X(j\omega)$  的比称之为频率特性，其数学表达式为

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = R(\omega) + jI(\omega) \\ &= A(\omega)e^{j\phi(\omega)} \end{aligned} \quad (1-2-13)$$

式中  $W(j\omega)$  —— 幅相频率特性；  
 $R(\omega)$  —— 实频特性；  
 $I(\omega)$  —— 虚频特性；  
 $A(\omega)$  —— 幅频特性；  
 $\phi(\omega)$  —— 相频特性。

如果知道系统的传递函数  $W(s)$ ，将传递函数中的算子  $s$  换成  $j\omega$ ，就可以得到系统的频率特性。

在实际工程系统中常常是输给系统一个幅值为恒定值  $x$ ，而频率为  $\omega$ ，可以正弦变化的信号，如图1-2-8所示。

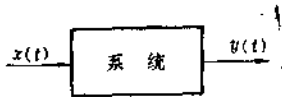


图1-2-8 线性系统

输入  $x(t) = x \sin \omega_i t$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。在某一频率  $\omega_i$  的正弦波作用下，等系统稳定后，测出系统稳定输出  $y(t) = Y(\omega_i) \sin[\omega_i t + \phi(\omega_i)]$  的幅

$$A_m = A(\omega) |_{\omega = \omega_x}$$

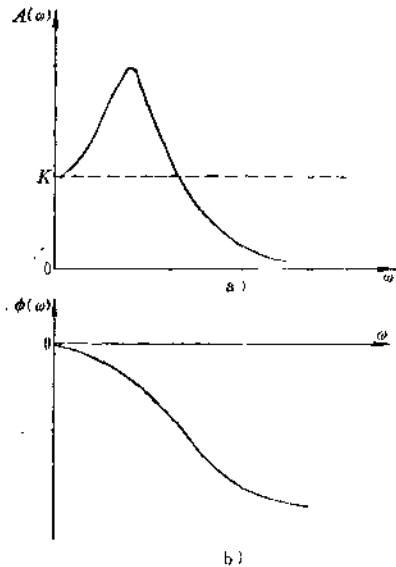


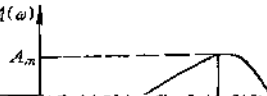
图1-2-9 频率特性

式中， $\omega_x$  称谐振频率，幅频特性在此处取得最大值。

2) 频带宽度  $\omega_{0.707}$  当  $\omega = \omega_{0.707}$  时，幅频  $A(\omega)$  的幅值为0.707，即

$$A(\omega) |_{\omega = \omega_{0.707}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0.707$$

3) 工作频带  $(0 \sim \omega_g)$   $\omega_g$  取决于给定值，当  $|1 - A(\omega_g)| = 2\%$  时， $\omega_g$  可以表示为  $\omega_z$ ；当  $|1 - A(\omega_g)| = 5\%$ ， $\omega_g$  可表示为  $\omega_0$ 。 $(0 \sim \omega_g)$  给出了频



率特性平直段的范围,这个指标对传感器是很重要的。

4) 跟随角  $\phi_{0.7}$ , 在相频特性上, 它为频率  $\omega = \omega_{0.7}$  时的角度。

## (二) 动态测试中的若干问题

### 1. 动态测试设备的选择

前面分析了系统动态性能的时域响应和频率特性, 表明是没有干扰和误差不大的情况下的动特性。但是在具体的情况下, 干扰总是存在的, 测量误差也是不可避免的。对于这些问题, 下面作一详细分析。

例如, 一个动态测试系统是由下列成分组成, 其系统的结构框图如图1-2-11所示。从图中看出分成两大部分:

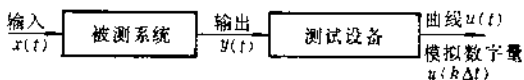


图1-2-11 系统结构框图

(1) 传感器系统 从图1-2-11中的传感器框图看出, 对于传感器的数学模型, 即静特性  $y = f(x)$ , 其动态数学模型即为传递函数  $W(s) = Y(s)/X(s)$ 。

(2) 测试设备系统 测试设备包括信息传输系统和信号处理与显示系统。对于一个动态测试设备的选择实际上是选择测试设备及仪器仪表应该具有的工作频带或采样频率。

在实际的动态测试系统中, 测试设备的输出, 可以是曲线  $u(t)$ , 也可以是模拟数字量  $u(k) = u(k\Delta t)$  以及其它的形式。

1) 对测试设备工作频率  $\omega_e$  的选择 对于测量设备的要求应当具有足够的工作频带  $\omega_e$ , 总的要求是  $\omega_e$  应大于被测量输出  $y(t)$  的最高次谐波分量的频率。实际工程中对于测量设备均看成是二阶系统, 常用下式表示:

$$\omega_n \geq (3 \sim 5)\omega_n' \quad (1-2-16)$$

式中  $\omega_n$  —— 测试设备的固有频率;

$\omega_n'$  —— 被测对象的固有频率。

图1-2-12对式(1-2-14)进行了说明。当测试设备的阻尼  $\xi = 0.7$  时, 与此相应的工作频带  $\omega_e = \omega_i = 0.6\omega_n$ , 在  $\omega_n = 3\omega_n'$  时, 则  $\omega_e \approx 1.8\omega_n'$ 。设被测系统的阻尼比不小于0.2, 曲线①是阻尼比为0.2、固有频率为  $\omega_n'$  的典型二阶系统的频率特性, 并将它作

为被测对象的频率特性。曲线②是阻尼比为0.7, 固有频率为  $3\omega_n'$  的典型二阶系统的频率特性, 将它作为测试设备的频率特性。曲线③是①、②两个二阶系统串联后的频率特性, 它的纵坐标值是对应频率下①、②两条曲线纵坐标的乘积。由图可见, 在  $\omega < \omega_e$  时, 曲线③与①是极为相近的。

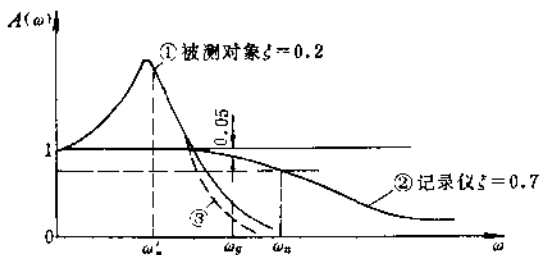


图1-2-12 测试设备的频率特性对测量的影响

2) 采样频率  $f_s$  的选择 当测试设备是采样器时, 采样频率  $f_s$  (相当于  $T_s = \frac{1}{f_s}$ ) 原则上应按香农定理确定, 即

$$f_s \geq 2f_m = \frac{\omega_m}{T_s} \quad (1-2-17)$$

式中  $f_m$  ——  $y(t)$  谐波分量的最高频率;  $\omega_m = 2\pi f_m$ 。

### 2. 测量误差及平滑处理

用采样设备对动态过程进行记录时, 量化误差将是测量误差的一个主要来源。采样频率与精度的矛盾关系, 使很多采样设备的模拟数字输出精度只能达到1%左右, 加上测量误差, 使得每次得到的样本  $y_i(t)$  值均不一样。为了得到可信赖值, 应当进行  $n$  次, 然后取平均值, 即

$$\bar{y}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i(t_k) \quad (1-2-18)$$

上述公式计算出  $\bar{y}(t_k)$  判定系统的动态品质指标和回归系统的参数模型。

上述方法在实际应用中是有困难的。其一是大量的重复动态测试有困难; 其二是动态测试中每一次测得的  $y_i(t)$  的时间起点很不容易取得一致。如图1-2-13所示, 真实的起点应在  $A$  处, 而每次的起点有可能提前在  $B$  点, 也可能滞后在  $C$  点。如果将起点不一致的  $y_i(t)$  作算术平均, 不但达不到消除偶然误差的目的, 反而引进误差。



响，可从下述几方面着手解决。

$$\int_0^{2\pi} \sin \omega_1 t \sin \omega_2 t dt = \begin{cases} 0, & \omega_1 \neq \omega_2 \\ \pi, & \omega_1 = \omega_2 \end{cases}$$

$$\int_0^{2\pi} \cos \omega_1 t \sin \omega_2 t dt = 0$$

$$\int_0^{2\pi} \cos \omega_1 t \cos \omega_2 t dt = \begin{cases} 0, & \omega_1 \neq \omega_2 \\ \pi, & \omega_1 = \omega_2 \end{cases}$$

式(1-2-20)中右端中的有关项为

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{kT} \sin^2 \omega t dt &= k \frac{\pi}{\omega} = \frac{1}{2} kT \\ \int_0^{kT} \sin \omega t \cos \omega t dt &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2-21)$$

对于干扰(噪声)  $n(t)$ , 其均值是零。因此, 只要积分时间  $kT$  取得足够长, 就可认为干扰的积分为零, 即有

$$\int_0^{kT} n(t) \sin \omega t \approx 0 \quad (1-2-22)$$

将式(1-2-21)及(1-2-22)代入式(1-2-20)右端后, 便得到:

$$R_e(y) = Y_m \cos \varphi = Y_m(\omega) \cos \varphi(\omega) \quad (1-2-23)$$

同理可得到:

$$I_m(y) = Y_m \sin \varphi = Y_m(\omega) \sin \varphi(\omega) \quad (1-2-24)$$

在正弦输入作用下的系统输出的幅值及相位为

$$Y_m = Y_m \sin \varphi = Y_m(\omega) \sin \varphi(\omega) \quad (1-2-25)$$

### (三) 正确选择敏感元件及测试仪器

#### 1. 正确地选择敏感元件

当被测对象确定后, 正确地选择敏感元件相当

由几个环节串联而成, 如图1-2-16所示。



图1-2-16 串联测量系统框图

各环节的传递函数为  $W_i(s)$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 则整个系统的传递函数为

$$W(s) = \prod_{i=1}^n W_i(s) \quad (1-2-26)$$

整个系统的对数幅频特性为

$$L(\omega) = \sum_{i=1}^n L_i(\omega) \quad (1-2-27)$$

式中,  $L_i(\omega)$  为第  $i$  环节的幅频特性。如图1-2-17所示  $L_1(\omega)$ 、 $L_2(\omega)$ 、 $L_3(\omega)$  分别为 1、2、3 三个环节的对数幅频特性曲线。且 1、2、3 三个环节分别为传感器、放大器和滤波器。显然这种测量系统或传感器的工作频带只取决于第三个环节, 第 1、2 两个环节的带宽无用。

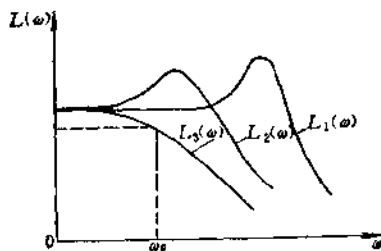


图1-2-17 三个环节的对数幅频特性曲线

#### 3. 正确选择各环节的参数

有些传感器的传递函数近似于衰减振荡的二阶系统。仪表与传感器的动态性能指标完全取决于仪表的参数, 例如 等效质量、等效阻尼与等效刚度

测点温度。并且要选择适当的动态补偿措施。

5. 正确使用仪表与传感器

在动态检测中，正确使用仪表与传感器很重要。如果使用不当，即使传感器有很高的频响，其测量效果也很差。例如，在使用电容传感器时，其连接导线的长短对传感器的性能影响很大。因而在使用中要特别注意其使用要求和注意事项。

三、测量链的形成与误差分析

仅用一台测量仪器来获取信息是很少见的，大多数测量必须用几台仪器组成一个测量链。

图1-2-18给出一个动态应变测量链的示例。测量传感器（对电阻应变片组成的惠斯顿电桥）将信号输入差动放大器，经处理后传给磁带机和光线示波器的快速振动检流计。对于整个测量来说，识别输入值  $x_e(t)$  和输出值  $x_o(t)$  之间的关系相当重要。

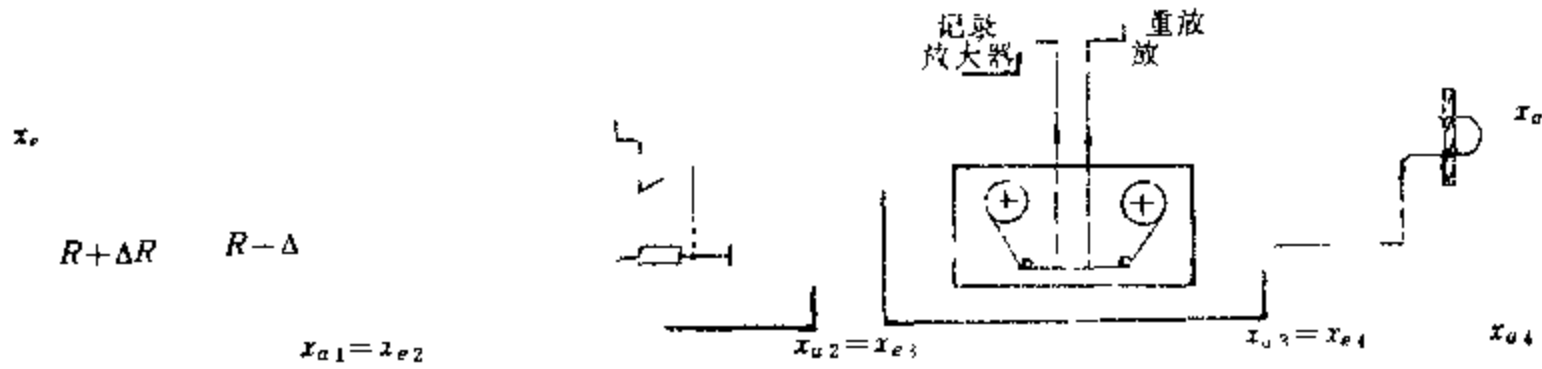


图1-2-18 动态应变测量链

$$\begin{aligned} \text{设 } x_{u1} &= G_1 x_{e1} & x_{u2} &= G_2 x_{e2} \\ x_{u3} &= G_3 x_{e3} & x_{u4} &= G_4 x_{e4} \end{aligned} \quad (1-2-28)$$

利用  $x_{e1} = x_{e2}$  的关系式可以得出：

$$x_o = G_1 G_2 G_3 G_4 x_e \quad (1-2-29)$$

测量链的传递特性取对于各环节的传递函数的乘积。传递函数  $G$  与每个复变函数一样，由幅值与相值的乘积求得，即

$$G = |G| e^{j\varphi} \quad (1-2-30)$$

由此，式(1-2-29)也可改写为

$$G_{总} = |G_1| |G_2| |G_3| |G_4| e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)}$$

假如图1-2-18中测量链的各环节皆为“平缓”幅值特性，即  $|G(j\omega)| \leq 0.95$ ，则相应会有对数衰减为  $-1.68\text{dB}$ ，而式(1-2-33)中的整个幅值误差为  $4 \times (-0.42)\text{dB} = -1.68\text{dB}$ ，而式(1-2-29)得出的  $\frac{x_o}{x_e}$  的值为0.83，即幅值误差为17%。当截止频率

$f_c = \frac{1}{\sqrt{2}}$  时，如图1-2-19所示，其总衰减为  $-12\text{dB}$ ，而且  $\left| \frac{x_o}{x_e} \right| = 0.25$  时，这相当于幅值误差为75%。



们经常用  $-3\text{dB} \approx -30\%$  表示恒定值。幅值  $|G(j\omega)| \leq 5\%$  范围内表示为平滑的幅频特性。

这里所讨论的动态测量仪器也反映了直流 (DC) 部分 ( $f=0$ ), 通过低通滤波器可使过程

$$G(j\omega) = \left| \frac{x_a}{x_e} \right| \text{理想化。}$$

为了表明幅频特性曲线, 当  $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.7$  时,

相对幅度误差为

$$\gamma = \frac{x_e - x_a}{x_e} \quad (1-2-34)$$

当频率比系数  $K = f/f_g$ , 得到一个对系统评定很有

用图1-2-20分析阶跃函数和起振时间的相互关系。

在最陡的地方做一条切线, 其交点的距离定为  $\omega_g t_{\pi}$ , 计算其陡度时, 有如下关系:

$$t_{\pi} = \frac{1}{2f_g} \quad (1-2-35)$$

上述分析只适用于象机械—弹簧—质量系统, 例如, 快速振动的检流计, 对于电子系统, 如放大器, 式(1-2-35)就不适用了。

快速振动检流计可以传递具有很小幅值差的宽频带。对于稳幅, 在起振过程中是允许有超幅振动的, 而对于电子测量仪器, 则要求有很好的“脉冲



### 四、测量结果的评定与正确使用仪器的关系

测量人员的任务固然在于对测量仪器进行维护和管理，但对测量结果的评定也是一个重要的工作，为了更深入地论述获得正确的测量结果与测量人员正确使用仪器的关系，下面从制定正确的测量方法、测量结果的评定以及实验设计的几个问题等三方面说明两者的关系。

#### (一)制定正确的测量方法

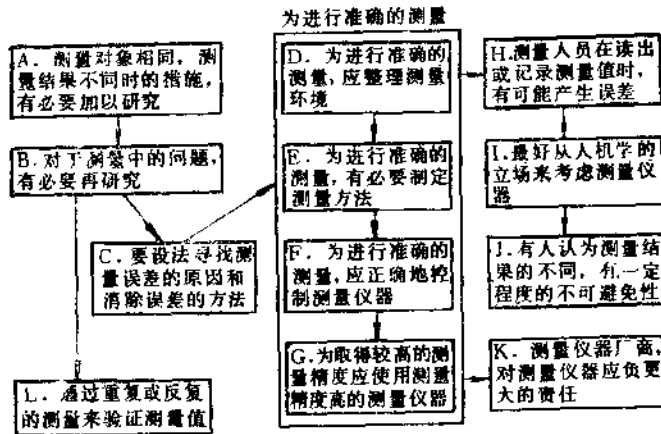


图1-2-22 制定准确的测量方案

在现实中，对同一测量对象，如果改变测量人员进行测量时，有时会出现不同的测量结果，这一点人们是比较了解的。而且为了防止这种情况出现，在方法上，大多把人员固定下来，设置专职的测量人员。但是这里应当研究的问题是，通常我们把测量熟练人员看成是能准确测量的人员这一固有观念是否正确。熟练人员的测量值和非熟练人员相比较，确是十分稳定的。但是，这只能说明人的内在变动少，而不能成为测量值无偏差的保证。不过，如果测量仪器的测量值被认为正确，而测量值的偏差又较明确时，则可采用对偏差加以补偿的数值。这样，能够减少“人差”所造成的影响。

此外，我们还就同一测量对象的测量值不同是否还有其他措施进行了征询调查。对此，大多数的回答认为，应采取同管理图等过去的数据进行比较的方法，或改变测量方法进行重复检验。

在回答中，有人提出为了减少“人差”，应制定正确的测量方法。可以看出人们对于测量上“人差”的认识并不十分明确。

在各个领域里都明确了“人差”的存在，在测量中也有过称作“个人差异”等误差引起的各种问题。从广义的角度解释测量上的“人差”不只限于测量值的读出倾向，而且也将涉及到测量仪器的使用操作或测量前的处理及测量后的处理。关于如何进行正确的测量问题，我们做了如图1-2-22所示的征询调查。

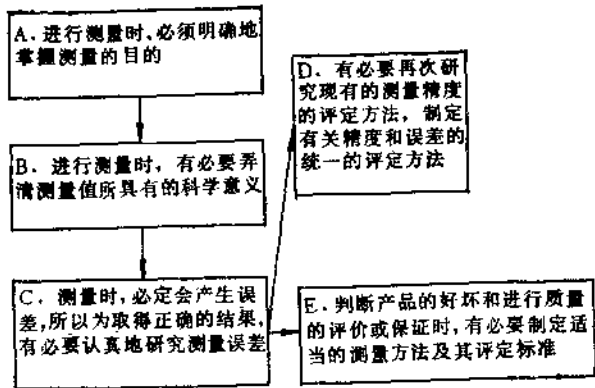


图1-2-23 测量结果的评定方法

#### (二)测量结果的评价

关于测量结果的评定方法，进行了如图1-2-23所示的征询调查。

为了正确地评定测量结果，关键问题是要正确地掌握测量的目的及其允许的误差。对测量结果的适当评定方法，在一部分人们当中虽然有一定认识，

俱尚未成为统一的评定方法,因此,可以认为在这一部分人当中也存在着问题。如图1-2-24a和图1-2-24b所示,对于没有很好地运用统计方法的问题应重新加以研究。

如图1-2-25a所示,大多数人认为如使用比规

定精度高出几级的测量仪器时,测量误差可以忽略不计。这种想法也未必正确。因为测量仪器的精度再高,也还存在着如何掌握测量对象或如何考虑测量环境影响的问题。

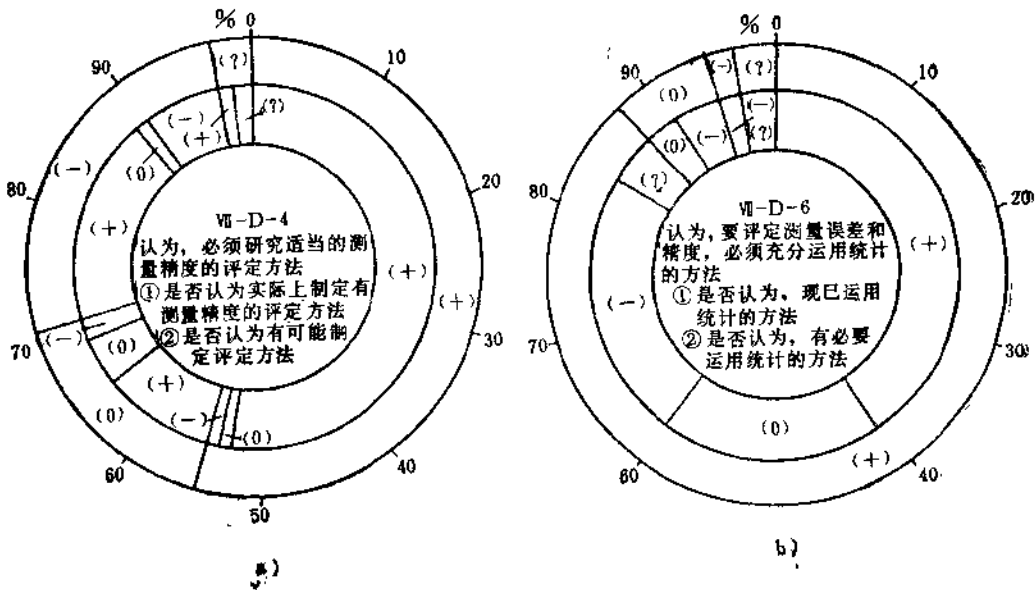


图1-2-24 测量精度的评定方法

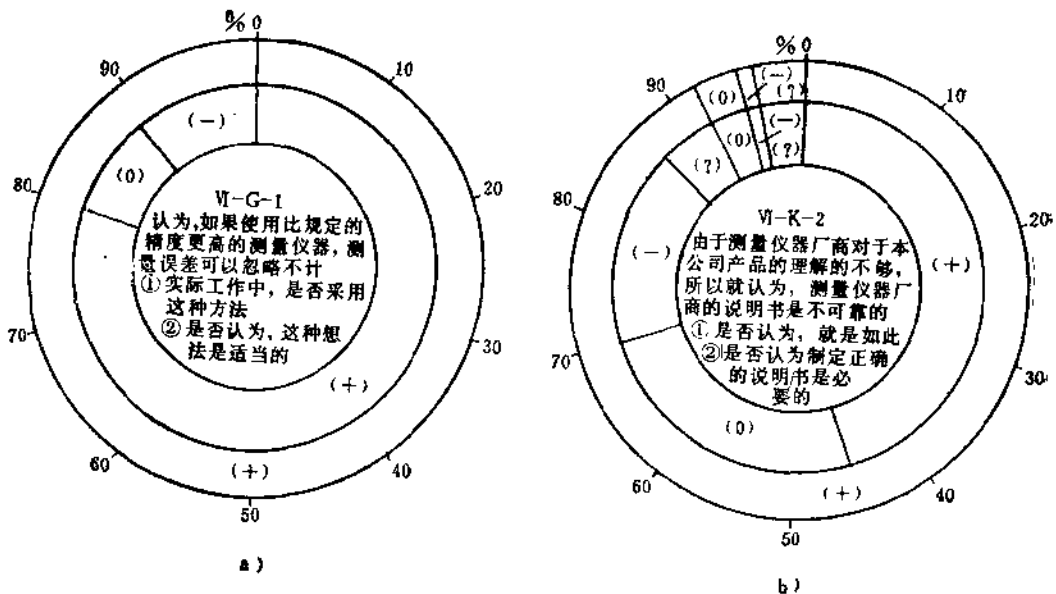
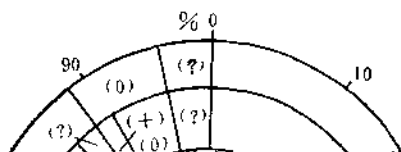


图1-2-25 传统方式认为测量仪器的误差

关于测量仪器的操作方法，一般靠规范等可以进行操作，但即使在主观上要进行相同的操作，而在实际工作当中，有时事与愿违，操作不尽相同。因此，对于只靠规范的说明能否取得相同结果的问题，还有必要加以研究。

由于测量仪器厂商对于公司产品理解得不够，而一般认为，测量仪器厂商的说明书是敷衍的、不可靠的，这表现在图1-2-25b中。

可以认为，由这种操作不统一而产生的误差也是“人差”的一种，但未必是测量人员固有的误差。总之，在测量中，误差的因素是多种多样的，因此，大多数情况下，即使降低其中的一种，作为整个的精度也不可能有多大的改进。归根结底，要正确地评定测量结果，需要测量人员正确地估计误差和掌握精度。这就需要如图1-2-26所示，通过教育、训练来学习这种知识和技能。



一般说来，检验受检仪器时，标准仪器的误差，对于受检仪器的误差极限来说应该是可以忽略不计。设标准仪器的误差为 $\pm n\%$ ，受检仪器的误差极限要求为 $\pm e\%$ ，那么 $e/n$ 的数值应该是多少才可以忽略标准仪器本身的误差呢？

对于通用电子仪器来说， $e/n \geq 10$ 时，忽略标准仪器本身的误差是可以接受的。有的单位就是这样规定的。有的国家要求 $e/n = 3 \sim 5$ ，作为对于标准仪器的要求，但是没有说明这样是否可以忽略标准仪器的误差。

如果仪器的系统误差较小（或已得到补偿），只考虑它们的偶然误差时，设受检仪器的标准偏差为 $\sigma_1$ ，标准仪器的标准偏差为 $\sigma_2$ ，当 $\sigma_2 = \sigma_1/3$ 时，则合成的误差为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = \sqrt{\sigma_1^2 + (\sigma_1/3)^2} = 1.05\sigma_1$$

如选 $e/n > 3$ 时，说明标准仪器对检验结果的影响小于5%。这就是有人认为标准仪器的误差只是受检仪器误差的1/3即可的根据。应该注意，只有满足了：1) 系统误差已修正或可忽略；2) 全部或基本上是在正态分布的偶然误差的前提下，才能把标准

在任何检验或测量中,严格地说都应该考虑到检验仪器本身(在有些情况下还要考虑到测量方法或测量系统)所产生的误差,并且在测量结果的数据处理中估计进去。

实际工作中,往往即使满足10倍的要求,但仍要在实际检验中扣除标准仪器所产生的误差,这样做才是安全可靠的。例如,使用一个 $\pm 0.1\%$ 的标准去校准一个 $\pm 1\%$ 的仪器时,校准结果不允许超过 $\pm 0.9\%$ 的误差才算合格。

从 $(e-n)$ 的准则来看, $e$ 与 $n$ 越是接近,则合格率低,这对于成批生产来说,将造成极大的困难。

例如,某一电源的输出电压为100V,误差极限规定为 $\pm 1\%$ ,当使用一个 $\pm 0.1\%$ 的电压表来检验时,其合格范围应为99.1~100.9V。假若其实际输出电压为100.89V(应该是合格的),而标准表的误差正好为 $+0.1\%$ ,此时读数将为100.99V,而被判为不合格,这样虽然永远不会使超差的产品通过,但必将产生这类不公正的不合格。为了减少这种情况的出现,虽然应该尽可能地使 $e/n$ 比值加大。如果这个比值小于3,则合格率显然会很低(即“不公正的不合格”的产品会增多)。

当用户使用允许误差为 $\pm m\%$ 的仪器来验收时,若受检仪器检验后的误差超过了 $\pm e\%$ ,但仍保持在 $\pm(e+m)\%$ 以内,不能作为超差退货的根据。

这是电子工业部的标准《电子测量仪器误差的一般规定(暂行)(SJ943-15)》中规定的。

### 2. 最佳实验条件的确定

当实验结果与若干条件有关,且这些条件的误差是固定的,如何选择条件才能使实验结果的误差最小,这就是确定最佳实验条件的问题。

这个问题的数学形式是:当实验结果 $f$ 是若干条件 $y_1, y_2, \dots, y_n$ 的函数,即

$$f = f(y_1, y_2, \dots, y_n)$$

由误差合成的方法可知, $f$ 的综合极限误差 $u$ 是 $y_i$ 与 $\Delta y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的函数(其中 $\Delta y_i$ 是条件 $y_i$ 的误差),即

$$u = \varphi(y_1, y_2, \dots, y_n, \Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n)$$

设各条件 $y_i$ 的误差 $\Delta y_i$ 都是固定误差,则由

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial y_1} &= 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial u}{\partial y_n} &= 0 \end{aligned}$$

可求得使 $u$ 最小时的各个 $y_i$ 值,这些值就表示最佳实验(或测量)条件。

以上是要求使 $u$ 最小来选最佳条件。同样也可以要求使 $u/f$ 最小,这时,最佳条件便可由下式求出:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial y_1} \left( \frac{u}{f} \right) &= 0 \\ &\vdots \\ -\frac{\partial}{\partial y_n} \left( \frac{u}{f} \right) &= 0 \end{aligned}$$

例如,用惠斯登电桥测量未知电阻 $R_x$ 时,则有

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2}$$

式中, $R$ 为已知电阻, $l_1$ 与 $l_2$ 为滑线电阻两臂之长度。问滑线电阻的触点应放在什么位置,方可使 $R_x$ 的相对误差最小?

设其它误差甚小, $R_x$ 的误差仅与 $l_1$ 和 $l_2$ 的偶然误差有关,因滑线电阻的全长为

$$l = l_1 + l_2$$

则 $R_x$ 的相对误差为

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{-l}{l_2(l-l_2)} \Delta l_2$$

由 
$$\frac{d}{dl_2} \left( \frac{\Delta R_x}{R_x} \right) = 0$$

又因为 $\Delta l_2$ 为常数,得

$$\frac{d}{dl_2} \left[ \frac{l}{l_2(l-l_2)} \right] = 0$$

微分后,令分子为零,得

$$l_2 = l/2$$

由此可知,当 $l_1 = l_2 = l/2$ 时,即滑线电阻的触点放在中央时,可得到最佳实验条件。

### 3. 误差分配问题

在设计仪表与传感器和测量系统时,常常需要根据技术要求中规定的允许误差来作方案选择的分析,其中既要作误差分析,又要作误差分配,以便对各元部件提出适当的要求,以保证整个仪表与传感器和测量系统等能满足设计要求。同样,实验前也需要按任务和精度要求来选择实验方案,确定该







鸣器进行检查,这样眼睛可以腾出来以跟踪走线。

元件故障包括参数不正确的元件在内。常用的元件有电阻、电容、电感、变压器、晶体管、集成电路和插接件,它们都可能出故障。

每一种元件都有一个参数叫做平均故障时间或MTBF,这是一种统计预测,表明这种元件能维持正常工作多少小时。失效率(或故障率)定义为 $1/MTBF$ 。知道了系统中每种元件的失效率就可以求出整个系统的失效率,这就是把系统中全部元件的失效率加起来。系统失效率的倒数即系统平均故

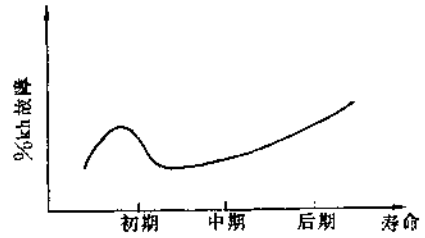
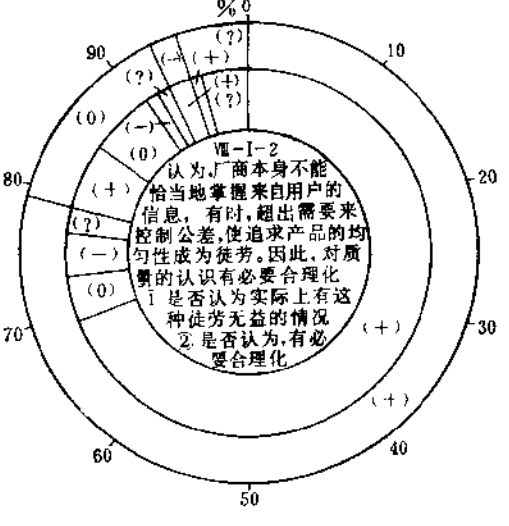
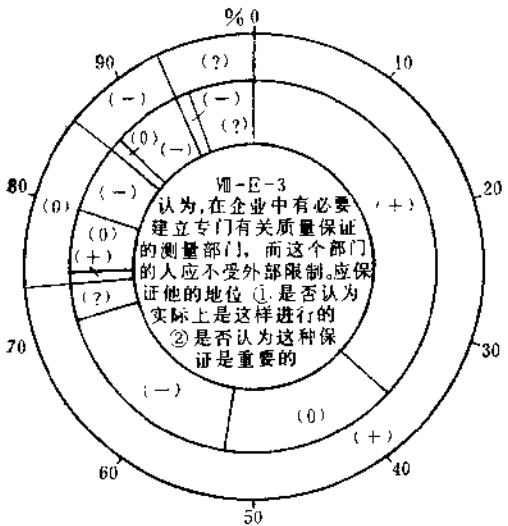
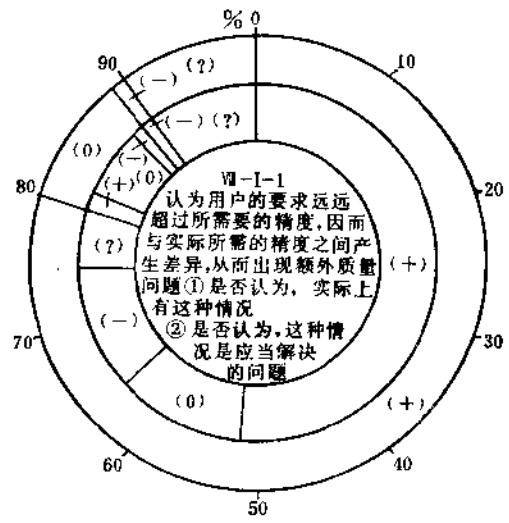
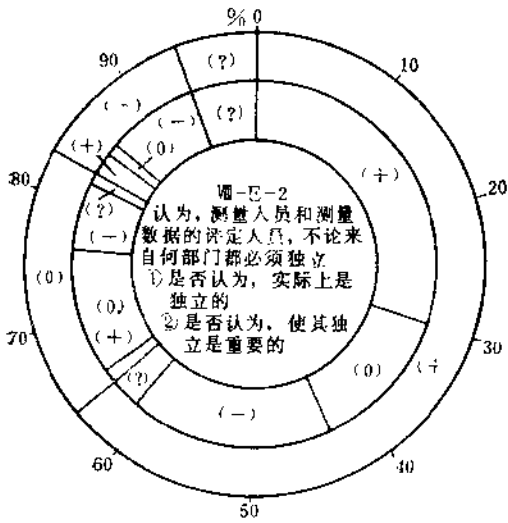


图1-2-27 %故障率与寿命的关系  
对于元件故障,可在静态下进行测试,也就是









测量受到限制，归根结底，如图1-2-35及1-2-36所示，是因为用户的要求远远超过所需精度而出

#### 第四节 现代化实验室的建设与对外科技服务

### 一、系统工程方法在实验室中的应用

实验室管理系统是一个多因素、多层次、多目标、全过程的相当复杂的动态系统。例如,科研实验管理、实验队伍管理、实验物质管理等子系统,它们和其它横向子系统,如科研管理、人事管理、财物管理以及后勤保障等系统存在着密切的相互关系。将系统工程的方法应用于实验室建设中,目的是使实验室发挥最佳作用。

#### (一)系统的目标

实验室管理系统的总目标即是面向现代化、面向世界、面向未来,为四化建设出成果出人才。在这个总目标下,实验室管理要科学地处理好系统内外各因素相互间的关系,充分发挥人的积极性、创造性,有效地使用财力、物力,为科学实验创造良好的条件,使实验室获得最佳效果。

从这一角度出发,实验室管理系统也经过了规划、设计、建设、使用、维护与更新创造等各个阶段,为使实验室能够发挥最佳效果,必须对其运动全过程实行动态最优化管理。

#### (二)系统工程方法的应用

系统工程方法在实验室建设与管理中应用比较广泛,主要表现在以下方面。

##### 1. 制定实验室建设的最优规划

要求管理人员不是单凭经验判断来做规划,而是对系统的目标、任务、环境、费用、效益等进行充分调查研究,对大量信息进行分析研究,建立若干个规划方案,提出系统应该具备的环境条件及估计系统所需的各种制约条件,预测规划完成的时间及投资限额等,进行可行性论证以确定系统的可靠性,再进行比较和评价,供决策部门选择最优的规划方案。这种方案的制定方法就是建立在系统工程的基本观点之上的。

##### 2. 利用系统的观点分配资金

如何使资金达到最优的分配,使有限的资金起到最大的作用、最好的效果。这个问题可以根据具体的情况建立数学模型,再决定是采用线性规划、或是非线性规划、或是动态规划。

##### 3. 利用系统的思想观点指导购买仪器设备

利用系统的对策与决策论的思想方法,指导购买仪器设备、技术引进以及和外商技术座谈等。

##### 4. 利用系统工程观点建立存储模型

在实验室的技术物质供应方面,怎样制定物质

采购计划,保证既可以满足各实验室物质的需要,又不会因备用物质过多而致使占用周转资金过多或库存积压过多,造成浪费。这类问题可以通过建立存储模型来解决。

##### 5. 系统工程排队论的应用

仪器设备的管理需要相对集中、专管共用和相对集中维修。根据各种设备仪器损坏维修的统计以及科研、对外技术服务对仪器设备数量、质量和使用人次的要求,决定配备多少维修人员才能满足需要,又不使配备人员过多,这可以借助系统工程的排队论来解决。

##### 6. 系统工程的模糊集理论的应用

利用系统工程的模糊集理论,指导建立实验室的评估指标体系。在评估指标中,一部分是可以量化的,但是也有相当一部分,例如关于科研实验质量、效果的指标,只能定性评议而不便定量化。对此,如何将这一定性指标与定量指标综合在一起,构成关于实验室的综合评定指标,这就需要利用模糊集理论。

综上所述,系统工程对于改善实验室管理、促使实验室管理现代化,有着十分重要的作用。

#### (三)系统效果的评价

实验室系统效果的评价,应该从社会效益与经济效益、宏观经济效益与微观经济效益、直接的经济效益与间接的经济效益、当前的经济效益与长远的经济效益等为依据进行综合评价,只有这样,才能真正反映效益的全貌。

社会效益,通俗地讲就是给社会带来的利益。这些利益有些是经济方面的,而有些一时未能给社会带来直接效益,但是对于人类的生存与发展、社会的文明与进步等大有益处。例如,基础理论的研究、定理、定律的验证等,对科学技术的发展是会产生不可估量的经济效益。

由此可见,实验室所产生的经济效益常附着于科学、技术、教育成果之中。有许多成果从微观看不出什么经济效益,或者当前不可能直接反映出来,但其宏观的、潜在的、长远的经济效益是不可估量的。

#### (四)系统信息的反馈

所谓反馈,就是控制系统把信息的输出量再反馈到输入端,从而起到控制作用,以达到预定的目的。管理的是否有效,关键在于是否有灵敏、准确和有力的反馈。

在整个管理系统过程中,都存在一个信息反馈问题。在系统的各个阶段都有大量信息,根据需要定时地或实时地进行收集、汇总和分析处理,把分析结果反馈到管理决策部门,对原来的规划、计划进行调整。改进组织管理、更新实验设备、优化实验队伍结构、调整管理体制等,以达到系统的最佳化。

## 二、电子计算机在实验室管理中的应用

### (一)实行计算机管理的必要性

随着实验室管理工作不断深入、提高,将会产生大量的信息流。例如,仪器设备的更新换代、科研课题在实验室内开展的情况、技术人员的考核与培训等,如果利用人工去跟踪、收集、整理、分析、计算这些信息,开展系统分析和优化设计,将会消耗大量的时间和人力,而难以取得良好的效果。为此,引入计算机管理,实行计算管理,将使各部门的工作更加协调,使管理工作从定性发展到定量,可以减少决策中的主观随意性,取得优化效果,使工作人员从繁重的劳动中解脱出来,去从事分析、判断和决策等创造性工作。

### (二)实验室计算机管理的内容

实验室管理包括的内容主要有以下几方面:

#### 1. 任务要求

如承担的研究课题、完成情况、成果评价推广应用以及对外科技服务中的承担项目、完成情况、成果评价、经济效益等。

#### 2. 物质条件

包括实验室建设、技术水平及具备的能力、实验设备、仪器的现代化程度、实验场地以及实验设备仪器的精密度、完好度和操作人员的技术水平、分析能力等各方面。

#### 3. 技术条件

实验队伍的情况:高、中级实验人员的比例、技术专长、工作能力和科研水平以及能承担新的实

领导亲自规划和领导。

#### 2. 计算机专业人员和实验室管理人员的密切配合

计算机管理系统的研究与应用是管理科学与计算机科学相结合的产物。从方案的确定、程序的编制、系统的运行、系统的评价、维护等过程都要有精通计算机技术的人员和熟悉实验室管理的工作人员密切合作。实验室管理人员只有正确地理解和掌握了计算机的基本知识,才能提出各种功能要求,才能维护系统的正常运行,当情况发生变化时可以对系统加以修改;而专业计算机人员只有熟悉实验室的管理要求才能编制成通用的程序包。

#### 3. 要有科学的管理基础

科学管理体制本身就意味着要具有完善的规章制度、稳定的工作程序、科学的管理方法和准确的原始数据。更具体地说,也就是整个管理系统要有一套合理的工作流程图,规定各个环节的工作内容和有关业务的信息流程,使管理职责范围规范化。

#### 4. 要有一定的物质条件

必须要有计算机及外围设备。例如,计算机、文件储存的存储库(模拟式和数字式磁带机、磁盘等)以及信息情报的输出机构和各类型终端设备,建立完整的数据库。

### (四)计算机管理系统的研制

前面已经阐述了计算机管理的很多内容,要有计划、有步骤地开发应用。首先要处理好总系统和子系统的协调关系,确定各自的目标、任务和相互的衔接关系,统一数据资源、信息编码、输入和输出形式等;其次要处理好计算管理与原来手工管理系统之间的关系;最后要处理好人与机器的关系,计算机只能代替人的部分工作,不能代替人的创造性劳动。因此,应安排好人机衔接问题。下面以仪器设备为例叙述计算机管理。

#### 1. 确定系统的功能

首先要确定计算机管理的工作范围,这是总体



新、报废、增减等功能是很需要的。

(3) 查询帐目的功能 为了解某仪器设备的技术性能可组合查询,也可单件查询。

(4) 帐目统计和报表输出功能 可打印出分类明细帐、分户明细帐、总台数、金额、使用率等。

#### 2. 选择机型和语言

机型的选择要考虑有发展的余地,主要从下述几个因素出发。

(1) 重视软硬件的结构 要有适当的内存和必要的外围设备。如键盘、显示终端、宽行打印机及磁盘驱动器。

(2) 要有足够容量的外存储器。

(3) 要有扩充及联网能力。

(4) 要有汉字终端。

(5) 价格较低,维护费较低。

语言选择应具有比较容易掌握的语言和较高级的语言。

#### 3. 基础资料的准备

系统管理水平发挥的好坏,主要决定于基础资料的选择和准备。要选择具有价值高、能反映出仪器设备的特征,而且齐全、准确的资料。

#### 4. 应用软件的设计

主要考虑功能强、效率高、工作质量好、改错、判错能力强、保密性好、系统安全运行可靠的软件,同时还要考虑可随时修改软件。

#### 5. 建立网络和数据库系统

仪器设备的管理系统关系到计划、采购、使用、维护、处理等许多环节和部门。如何把这些环节和部门的信息连接起来,需要使用计算机建立复合网络并建立相应的数据库,充分发挥电子计算机资源的作用。

### 三、信息在实验工作中的应用

#### (一) 信息分类

##### 1. 信息

包括的内容广泛,就实验室系统来讲,主要包括:实验室仪器及其环境建设的文件资料、实验室和物质管理的规划、计划和规章制度、国内外实验室和物质管理动态、管理的理论研究和实践经验的总结以及实验技术资料和设备资料。

##### 2. 信息反馈

反馈是一种动态信息,运动的各个阶段都会产生信息,系统的每个层次、每个管理人员都有责任收集和反馈这些信息,便于使领导层做出决策。

#### (二) 信息资料的来源

##### 1. 连续信息

来自专利期刊、文献资料、产品样本、产品目录、产品手册、学术论文、有关刊物、报纸等。

##### 2. 偶然信息

如参观访问、技术座谈、市场调查、各种展览会、订货会以及广告等。

##### 3. 征询信息

科技人员经常参加各种国内外学术会议,各种类型的新产品技术鉴定会以及科学试验测试设备的考核会等,这是一个很重要的信息源。

#### (三) 收集信息资料的原则

收集资料要特别注意原始资料的全面性和可靠性,根据要求,有针对性地收集最新资料,应善于捕捉技术经济的新情况、新信息、新资料,加强信息资料的新陈代谢。

#### (四) 信息资料的收集方法

除了广泛订阅相关的期刊和报纸,及时订阅有关产品目录和手册之外,同时还要随机收集一些偶然信息以及定向收集、专家征询和实地考察等。

#### (五) 信息资料的加工整理及传递

对信息资料的分类是指排序、比较、选择等方面的工作。同时应及时地将信息资料传递给各专业人员,使其发挥巨大作用。

#### (六) 信息与器材共用

信息在器材共用中占重要地位,通常包括有经济政策信息、国内外同类学科或科学研究项目对现代技术的应用信息、产品资源信息、市场信息、价格信息及有关经济信息等。

##### 1. 信息资料是实验室建设的依据

在实验室建设中,能及时、准确、全面地了解实验室的规模、装备水平、与国内外同类实验室的差距,了解科研水平与成果应用概况等,以便做出正确的、合乎实际情况的决策,这一点是相当重要的。

##### 2. 信息资料是计划供应人员搞好业务的保证

及时、准确、全面的信息资料 and 比较雄厚的资料储备是计划供应人员搞好工作的基础。当计划供应人员能掌握市场动态、熟悉渠道和国家的流通政策时,就可以根据市场变化情况,及时调节供需关系,搞好供应。

##### 3. 为专业人员选择技术装备提供咨询

近代先进的技术装备多具有综合性强、相互渗透和相互结合的特点。特别是微电子技术、光纤和激

光技术的发展更加加速了这一步伐。而由于专业技术人员受到知识面的限制,故要求有关部门提供咨询。信息资料正好为此提供方便。

#### 四、开展大型实验室间的技术协作

为充分发挥大型、精密、贵重仪器装备在科研工作中的作用,提高投资效益,建立测试中心,开展精密仪器的协作共用,提高使用效率和挖掘仪器设备的潜力。

##### 1. 实验室间的协作

协作是指两个或两个以上实验室的互相配合,共同完成某项任务,发挥大型、精密、贵重仪器的

作用,这是现代化科学技术发展的需要,也是提高实验室效益的一条有效途径。

搞好实验室间的协作应当以自愿和互利为原则。可以从一个单位、地区、甚至全国的实验室间开展协作。

##### 2. 对外科技服务

在仪器设备较齐全、实验条件较好、技术力量雄厚的实验室,保证完成本单位科研任务的前提下,应当加强同社会联系,开展科技对外服务,促进四化建设。其协作范围常分为技术服务和技术培训等。

# 第三章 物理参数探测方法的基本知识

(续)

## 第一节 传感器与实验室仪器

### 一、传感器的基本类型及其应用范围

表1-3-1列出了各领域对传感器的需要。当然，

除了温度、压力、位移、转速、流量、液

领域	所需传感器的种类	应用目的
汽车	温度、压力、位移、转速、流量、液	方便、舒适，提高性能，控制废气

(续)

传输信号类别	工作机理	检测电路	主要局限性	典型例子
3. 波长	光谱与吸收、辐射和折射系数的变化有关	两个固定波长的幅值比较或扫描波长的模拟信号比较	要有适合的扫描波长源, 波长与线损耗有关	用可变的法布里珀罗共振腔, 双折射单晶, 半导体带隙偏移的温度测量
4. 时间分辨	利用单模光纤的瞬态吸收或发射特性具有反馈时, 光纤回路的渡越时间	时延脉冲分析	在光纤中的模态时间色散	与稀钬铁荧光的时延温度计, 用西林柯夫光的核辐射诊断
5. 偏振	旋转光张量的变化	振偏分析器和幅值比较	光纤中自发的和固有的双折射	高压电流测量仪, 光高斯计

表1-3-3 光传感器的应用

被测区	变换原理及检测机构	检测量	器件、装置
温度	热膨胀: 膨胀体变形及光阑机构 膨胀体变形及光偏转机构 膨胀体伸缩/变形导致遮光	双金属变形引起的遮光量 双向光纤偏转、镜面反射偏转 水银柱伸缩, 双金属引起遮光	双金属光温度计 光纤对温度计 光水银温度继电器
	热应力折射 双折射的温度变化 折射率的温度变化 透过率的温度变化 荧光发光的温度变化	偏振角、色 偏振角旋转/检测光强度变化 干涉强度变化 热散乱衰减、结晶吸收端移动 荧光脉冲时间常数的变化	双折射温度计 多波干涉温度计 结晶吸收光温度计 光纤吸收温度计 光纤荧光温度计
压力 (应变、转矩、加速度)	受压弹性体的变形与光阑机构 光的反射、偏转 光的干涉 受压弹性体的应力双折射 受压光纤纤芯折射率的变化 加压液晶漫反射的变化	接受光强度变化 接受光强度变化 干涉带的变化 偏振角、色 波导光相位变化量 接受光强度变化	光纤压力计 光纤血压计
	涡轮旋转使光断续 卡门旋涡对光调制	脉冲光周期 调制光频率	光涡轮流量计 光旋涡流量计
流速	激光多普勒效应	干涉法检测相位差	光多普勒流速计
液位	双向光纤/光纤陈列与液体的光吸收能力 液体中的光泄露 (U字型光纤、直角光纤) 透明液体浸没反射体	接受光强度两位置变化 接受光强度 (两位置/连续) 变化 接受光强度变化	光纤液位计
	化学发光 浮秤比重 溶液折射率 荧光吸收	荧光发光强度 光偏转 光偏转 接受光强度及吸收光谱	荧光成分传感器





(续)

被测量	变换原理及检测机构	检测量	器件、装置
浊度	光的漫反射率	漫反射光强度	漫反射光浊度传感器
振动声音	振动体对光调制 振动光纤对光调制	调制光周期 调制光周期	光纤振动音响传感器
	磁光效应: 常磁性玻璃	偏振光转角/检测光强度	光纤/常磁性玻璃传感器

(续)

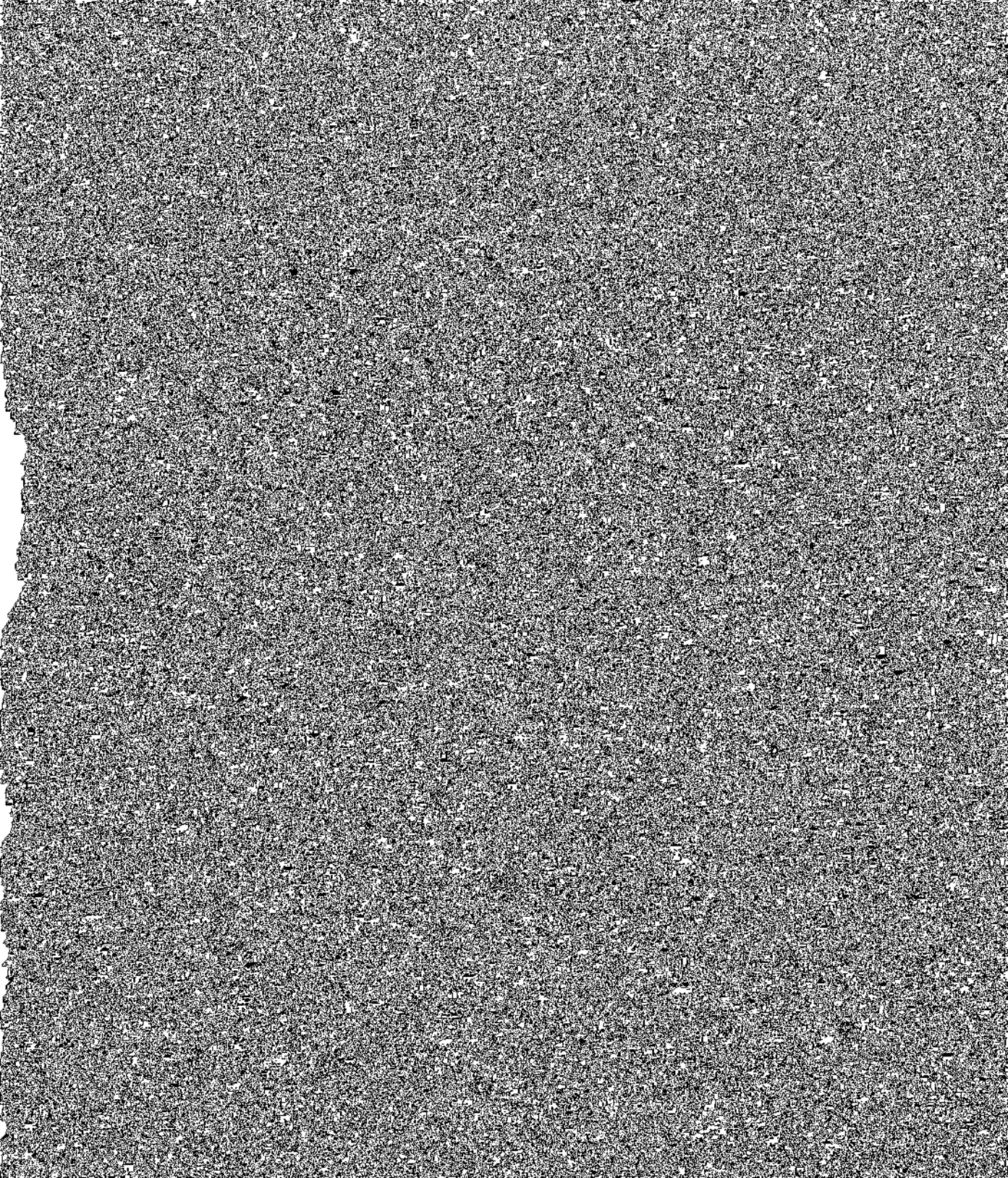
作的目 测的对 象	件 数	具体的用途	件 数	敏感元件 种类和名称	应用的转换功能	材料种类	技术上的问题	
机	位置	身体计测, 医 用诊断	1	3维坐标测定 敏感元件	(光-电转换)	(无机半导 体)	测定范围要宽, 精 度要高	
		机器人手臂的 控制	1	LED, ITV	(光-电转换)		(检测范围动态范 围)	
	位移	精密位置测定	1	电容型位移敏 感元件	因狄义的电应 变效应引起的介 电常数变化	PMN系电应 变材料	温度特性的改善	
	应变	2	计测器	1	半导体应变敏 感元件		微晶无定形Si	要获得再现性良好 和高电导率
			机器人	1	力检测敏感元 件	压电效应	(有机高分子)	(精度、精确度)
	角度	2	喷气机的姿势 控制	1	光纤陀螺仪	Sagnac效应 (萨格纳克效应)	Si纤维	抗干扰性要强, 灵 敏度要高
			火箭的姿势控 制	1	陀螺仪	光电效应	合金	检测极限要微小
	加速度	人造卫星的导 航	1	静电支持型超 低加速度计	位移-电压	钨	以 $10^{-5} \sim 10^{-10}g$ 的高精度为目标	
	旋转角	1	福利机器人用	1	姿势敏感元件	静电电容及电 磁感应	流体	灵敏度和精度
			信息处理通信	1	MR敏感元件	霍尔效应	(金属间化合 物)	
	力	3	车辆重量计测	1	电容型压力敏 感元件	由狄义电应变 效应引起的介电 常数变化	PMN系电应 变材料	温度特性要改善
			步行解析 (负载分布)	1	负载敏感元件	接触电极的碳 纤维根数变化	各向异性导电 性硅橡胶片	橡胶片内的特性要 均匀
			两脚步行机器 人的控制	1	应变仪(片)	(压电转换)	(金属、合 金)	(灵敏度和检测极 限)
	压力	1	工业用计测器	1	半导体应变敏 感元件	压阻效应	Si半导体	要在 $400 \times 90.066$ kPa $40MPa$ 的压力





(续)

作为目	件	件	敏感元件的	应用的特殊材料	材料种类	技术上的问题
-----	---	---	-------	---------	------	--------





(续)

作的目 测的对 象	件 数	具体的用途	件 数	敏感元件的 种类和名称	应用的转换功能	材料种类	技术上的问题
化	成分组 成	5 环境、安全、 气象 有毒气体检测 空气污染的监 视 气体漏泄报警 器  可燃性气体的 检测 环境·安全	5	半导体敏感元 件	电荷溢出晶体 管	Si半导体	灵敏度的稳定性
				半导体薄膜气 体敏感元件	表面氧化还原 反应	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	要稳定在8年以上
				半导体薄膜气 体敏感元件	因氧化物半导 体的气体表面吸 附引起的电荷移 动	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 金属氧 化物半导体	要求在350~400°C 加热状态下保持3~ 4年特性稳定
				气体敏感元件	热阻效应	SiO <sub>2</sub> 膜	要防止劣化
				超微粒子气体 敏感元件	因表面氧化还 原反应引起的电 阻变化	主要是SnO <sub>2</sub>	缺乏重复性
化	气味	5 科学计测  环境、安全、 气象 气味检测  安全	1  3	可燃性气体敏 感元件	(催化反应)	(无机半导 体)	(时效)(老化)
				气味物质的敏 感元件	嗅觉器, 化学 接收的膜电位变 换	嗅觉细胞	没有长时间的耐性
				气味敏感元件	电生理反应	生物	使用时间可能很短

(续)

作的目 测的对	件 数	具体的用途	件 数	敏感元件的 种类和名称	应用的转换功能	材料的种类	技术上的问题	
生 体	生体机械量	2	保健、医疗 医用(体内 计测) 血压测定	2	超小型压力敏 感元件 半导体应变敏 感元件	因压电效应引 起的电阻变化 压电效应	Si半导体 Si	低漂移 肥胖体的检测极限
	生体化学量	3	保健、医用 保健、医用 医用(体内 计测) 生体离子测 定	3	生物敏感元件 化学敏感元件 半导体离子敏 感元件	因酶引起的氧 化还原反应 半导体酶的电场 效应 因酶引起的氧 化反应	呼吸功能(有 机、微生物、组 织) Si半导体	时效(老化) 离子选择性要好 要能够埋入体内
	生物量	1	植物浮游生物 的计测	1	生物测定用光 敏感元件	(光电转换)	PM	消除外部光的影响
检 验 体	免疫血清	4	保健、医疗 抗原抗体反 应的直接测 定 临床化学分 析 医疗计测、 保健 抗原-抗体	4	生物敏感元件 半导体生物敏 感元件 生物化学FET 生物膜仿敏 元件	抗原-抗体反 应→电转换 因抗原-抗体 引起的膜电位变 化 抗原-抗体反 应 免疫反应	蛋白、半导体 免疫FET, 酶 FET(Si半导体) 抗原-抗体, Si半导体 生物膜仿膜	抗原-半导体间的 转换功能效率的提高 要从各种检测对象 中检测出一种物质 因其他物质引起的 污染
	其 他	4	科学计测 半导体材料	2	红外线敏感元 件 压电敏感元件	热电效应 压电转换	HgCdTe ZnO	要能检测出微量发 热 要作成非接触型的
			微波遥感	1	电波(微波) 敏感元件	电波的反射, 吸收等	(无机半导 体)	要提高空间分辨率 和消除杂波
		1	溶存O <sub>2</sub> 分压	1	电化学气体敏 感元件	浓淡电位差	碳电极	气体透过膜的选择

表1-3-5 半导体气体传感器的分类

	主要的物理特性	传感器举例	工作温度	代表性被测气体	
电 阻 式	电 阻	表面控制型	氧化锡、氧化锌	室温~450°C	可燃性气体
		体空制型	$La_{1-x}Sr_xCoO_3$ , $r-Fe_2O_3$ , 氧化钛、氧化钴、氧化镍、氧化锡	300~450°C 700°C以上	酒精、可燃性气体 氧 气
非电阻式	表面电位	氧化银	室 温	硫 醇	
	二极管整流特性	铂/硫化镉、铂/氧化钛	室温~200°C	氢气、一氧化碳、酒精	
	晶体管特性	铂栅 MOS 场效应管	150°C	氢气、硫化氢	

表1-3-6 S型高灵敏度湿度计的分类

型 号	检测元件型号	测量范围 (%相对湿度或温度)	精 度	备 注
AKH	ULK	10%~30%	± 2%	用校正表校正
	LK	20%~40%		
	MK	40%~70%		
	HK	70%~90%		
	UHK	80%~99%		
AKY	DRK	40%~90%	± 3%	直 读
AKL	DRLK	20%~90%	± 3%	直 读
AD-1	DRLE	20%~90%	± 3%	数字显示
AKD	ULDK	-25~18.5°C	± 0.5°C	使用校正表校正测量范围的上、下限, 受环境温度限制
	LDK	-19~23°C		
	MDK	-12~33°C		
	HDK	-5~38°C		
AH-1P AH-2P	ULP	10%~30%	± 0.5%	用校正表校正
	LP	20%~40%		
	MP	40%~70%		
	HP	70%~95%		
AR-22B AR-33B AR-66B	ULB LB MB	10%~30% 20%~40% 40%~70%	± 2%	使用校正表校正

(续)

(续)				(续)			
大类	中类	小类	代表性举例	大类	中类	小类	代表性举例
PNC	无机物	钛酸钡类	钛酸(钡、锶、铅)烧结体	PNC	有机物	パボスタ 石墨类	三乙醇胺、水、氯化钠
		铋、钨、镍氧化物类 铅、铁、钨氧化物类 硅类 硫属玻璃			液体	三乙醇胺混合物类	
				CTR		砷、钨氧化物类; 银硅(银铜)(铋铜承)X类 钛酸钡单晶	砷、磷(铜、钨)氧化物 银硅-硫化铜

表1-3-3 各种霍尔元件的性能

项目 种类	输入电流 $I$ (mA)	无负荷霍尔电压 $V_H$ (mV) $B = 1 \text{ kG}^{\text{①}}$	输入电阻 $r_1$ ( $\Omega$ )	输出电阻 $r_2$ ( $\Omega$ )	灵敏度 $K_H$ (mV/ (mA·kG <sup>①</sup> ))	不平衡电压 $V_0$ (mV)	$V_H$ 的温度系数 $\beta$ (%/°C)	$r_1$ 和 $r_2$ 的温度系数 $d$ (%/°C)
砷化镓	100	$\geq 8.5$	约9	约1.5	$\geq 0.085$	$< 0.5$	约-0.1	约0.2
	150	$\geq 12$	约2	约1.5	$\geq 0.08$	$< 0.3$	约-0.1	约0.2
	400	$\geq 30$	约1.4	约1.1	$\geq 0.075$	$< 1$	约-0.07	约0.2
磷砷化镓	100	$\geq 13$	约6.5	约2.4	$\geq 0.13$	$< 0.15$	约-0.06	约0.2
	100	$\geq 14.5$	约5	约3	$\geq 0.145$	$< 0.1$	约-0.04	约0.2
	200	$\geq 29.5$	约5	约3	$\geq 0.146$	$< 0.2$	约-0.04	约0.2
镓	20	$\geq 6$	40	30	$\geq 0.25$	0.5, 1.5, 3.0, 10.0	0.02	0.5
	15	$\geq 43$	300	200	$\geq 3.0$	4种	0.02	0.5
铋化镓	5	250~550	240~550	240~550	50~110	10	-1.0~-1.3	-1.0~1.3
	10	80~300	10~30	10~30	8~30	10	-2.0(最大)	-2.0(最大)
砷化镓	5	15~110	200~800	200~800	3~22	$V_H$ 的20% 之内	-0.05	0.5

①  $1\text{G} = 10^{-4}\text{T}$ .

表1-3-3 多功能陶瓷传感器的技术性能规范

湿度-气体传感器		温度-湿度传感器	
传感器陶瓷的尺寸: $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 0.25\text{mm}$		传感器陶瓷的尺寸: $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 0.25\text{mm}$ 电热丝的尺寸: 250mm	
湿度特性		特性	
工作温度(°C)	1~150	工作温度(°C)	-40~150
工作湿度(%相对湿度)	1~100	工作湿度(%相对湿度)	1~100
灵敏度		灵敏度	
$R1\%$ 相对湿度( $\Omega$ )	$9 \times 10^7$	温度	
$R1\%/R20\%$	50	C-40°C (pF)°C	1650
$R1\%/R40\%$	500	C-40°C/C0°C	2.0
$R1\%/R60\%$	1500	C-40°C/C40°C	4.7
$R1\%/R80\%$	4300	C-40°C/C80°C	7.3
		C-40°C/C120°C	9.4





表1-3-11 压力传感器

	压力范围 (1bf/in <sup>2</sup> ) <sup>②</sup>	精度 满刻度偏转	工作温度 (°C)	稳定性	抗冲击 和振动	电源	频响特性	备注
扩散型 半导体	0.1~10k	0.01~0.35 <sup>①</sup>	-55~125	0.25% 10 <sup>4</sup> 周期后	件	10~28V 直流	0~100kHz	体积小, 成本低, 对温度敏感
电容式	0.01~10k	0.05	-20~80	0.05% 10 <sup>7</sup> 周期后	不好~好	交、直流, 专用	0~100Hz	灵敏度高, 需要前置放大器 放得靠近些
磁阻式	0.04~10k	0.05	-200~315	10 <sup>6</sup> 周期	很好	交流, 专用	0~1kHz	坚固结实, 要用交流电源
压电式	0.1~10k	1	-270~205		佳	直流放大	1~100kHz	体积小, 需用或本高的 放大器
电位式	5~10k	1	-55~150	10 <sup>6</sup> 周期	不好	交、直流	0~50Hz	输出大, 存在磨损问题

① 超过温度范围的极限值。

② 1bf/in<sup>2</sup> = 6.89476kPa。

表1-3-12 农用传感器的应用情况

	固定的农田水利灌溉监测系统	机动农田设备发动机和传输机构的监测	田间管理设备的监测	植物加工和贮藏的监测
应用 变量	泵的故障诊断 土壤测湿 农田环境测量 植物顶冠的测量 水的过滤	发动机转速控制 发动机燃油控制和故障诊断 发动机燃油的测量 传动机构控制 行驶速度控制	推土机控制 收割机控制 耕耘机控制 喷酒机控制	建筑环境控制 挤奶机控制 谷仓控制
温度	× × ×	× ×		× × ×
压力	× × ×	× ×	× × × ×	× × ×
流量	× ×	× ×	× ×	× ×
水分和湿度	× ×			× ×
速度/位置	×	× ×	× × ×	

二、传感器特性

无论采用什么样的测量线路，其性能都受到传感器的电特性及其输出特性的制约。一般常用传感器的参数来表征传感器的特性。例如，灵敏度、电压和电流的电平、线性度、重复性、增益、失调、漂移、时间常数、电的最大额定值、分布阻抗和任何其它的一些参数来精确地表征传感器特性，但一般常归纳为传感器的输入输出特性、传感器的静特性和动特性用它来描述传感器特性，下面分别介绍传感器特性。

(一)传感器的输入输出特性

1.输入特性

新韦氏大辞典对传感器的定义是：“从一个系统接收功率，通常以另一种形式将功率传送到第二个系统中的器件”。例如，前面所介绍的输入传感器就是受到力、压力、温度、流量和液面等物理量的作用后，将其转换成电信号送到测量和控制系统的输入端。这种特性称之为传感器的输入特性。

由于传感器受外界环境的影响，给能量的传递带来误差以及由于传感器的影响破坏了被测物理参

数的自然状态,这就使测量结果带来误差。而输出特性就是要给出衡量这种干扰的严重程度的技术指标,也即是说,用一个技术指标去衡量传感器对被测对象的“载荷”效应的大小。

衡量传感器对被测对象的“载荷”效应的主要参数是输入阻抗。

电学中的阻抗: 阻抗 = 电压/电流

力学中的阻抗: 阻抗 = 力/速度

广义表示: 阻抗 =  $\frac{\text{驱动变量}}{\text{流动变量}}$

对传感器来讲,不同的物理量对传感器输入阻抗的要求也不相同。例如,测量力时,当输入阻抗愈大,则单位时间内从被测量中吸收的能量也就愈小。反之,当测量速度时,传感器的输入阻抗愈小愈好。

## 2. 输出特性

传感器输出一般是电量,因此与后接的仪器之间也有阻抗匹配问题。因而有的传感器给出输出阻抗。例如,低电平传感器,象热电偶,需要好的低噪声低漂移的放大器才能可靠地分辨出微小的温度变化;又如压电式传感器是具有较高阻抗的传感

器,则要注意接线电容和放大器的输入特性(输入阻抗、漏电流、电荷和电压工作方式)。

## (二) 传感器的主要静特性及技术指标

衡量传感器的静特性常由以下几方面技术指标来考核。

### 1. 精密性、准确度、精确度、精度

精密性、准确度、精确度、精度四个名词都是误差的反义词,国内外对这几个名词的定义尚未完全统一。根据实用工况定义如下,供参考。

**精密性**——亦称精密性。表示在多次测量中所测数值的分散程度。偶然误差小,重复测量结果就密集,精密性就高。但精密不一定准确,如图1-3-1a所示便是一种精密度高,而准确度不高的打靶记录。

**准确度**——亦称准确性。表示测量结果与被测量值的偏离程度。系统误差小,准确度就高。但准确不一定精密。

**精确度**——简称精度。是测量结果的精密与准确程度的综合反映。精确度高,表示系统误差与偶然误差都小。图1-3-1b所示为既精密又准确的打靶记录;图1-3-1c则是精确度很差的打靶记录。

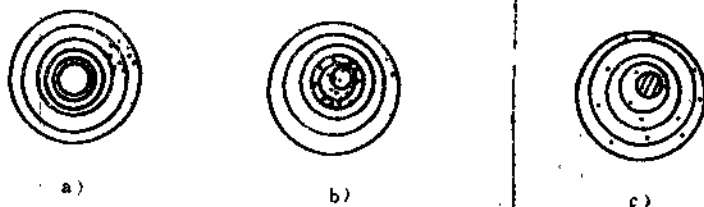


图 1-3-1

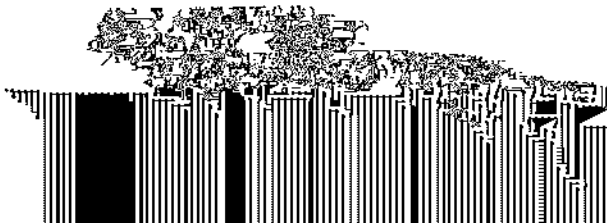
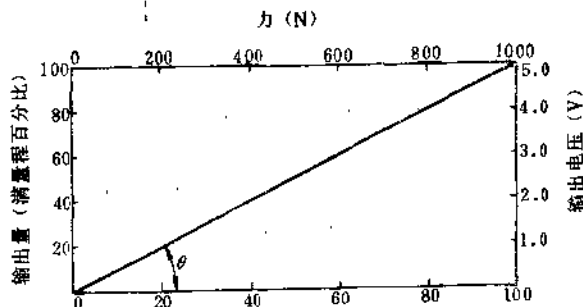
a) 精密度高、准确度不高的打靶记录 b) 既精密又准确的打靶记录 c) 精密度很差的打靶记录

## 2. 灵敏度

灵敏度是指在静态测量时,测量仪表输出量的增量与输入量的增量之比。例如,当输入量变化 $\Delta x$ 时,则输出量 $y$ 的相应变化量为 $\Delta y$ ,则传感器的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

或  $S = \frac{dy}{dx}$  (1-3-1)



理想静特性曲线的方程式为

$$y = Kx \quad (1-3-2)$$

其灵敏度是常数, 即特性曲线的斜率为  $\text{tg}\theta$ , 也就是特性曲线的比例常数, 即

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \text{tg}\theta = K \quad (1-3-3)$$

静态特性曲线的斜率越大, 其灵敏度也就愈高。灵敏度的量纲是输出量的量纲与输入量的量纲之比。

例如压力传感器的灵敏度为  $S = \frac{\text{输出电压}}{\text{牛}} (\text{V/N})$ 。

### 3. 量程

仪表传感器与测试系统能测量的最小输入量(下限)至最大输入量(上限)之间的范围称为量程。如上图所示其量程为  $0 \sim \pm 1000^\circ\text{C}$  的线性温度传感器。对应于满量程输入时的输出量称为满量程输出。

量程可能是单向的, 也可能是双向的, 可能是对称的, 也可能是不对称的。例如, 测温范围从  $0 \sim 1000^\circ\text{C}$  称之为单向; 若  $0 \sim \pm 1000^\circ\text{C}$  则称之双向对称; 若从  $-20 \sim +1000^\circ\text{C}$ , 则称双向不对称。有时中间无零区, 例如  $+10 \sim +100^\circ\text{C}$ 。

测量的上限值与下限值的代数差称之为测量范围。例如, 量程  $-200 \sim +1000^\circ\text{C}$  的温度测量范围为  $1200^\circ\text{C}$ 。

### 4. 分辨力与灵敏度

能引起输出量发生变化的最小增量称为分辨力。例如, 电刷在一匝导线上滑动时, 其输出电压不变。能引起输出电压发生变化的最小电刷位移  $\Delta x$  就等于电位器的导线直径。电位器的导线越细, 其分辨力  $\Delta x$  的数值越小。一般传感器在全量程范围内, 各处的分辨力  $\Delta x$  是不相同的, 用全量程中最大的  $\Delta x_{\text{max}}$  除以满量程值  $x_{\text{max}}$ , 以所得的百分数作为分辨力的技术指标称为分辨率, 即

$$\delta = \frac{\Delta x_{\text{max}}}{x_{\text{max}}} \times 100\% \quad (1-3-4)$$

在起始位置, 能引起输出量发生变化的最小输入量一般称为灵敏阈(死区、失灵区、阈值等)。这是衡量起始位置不灵敏程度的指标。

### 5. 迟滞误差

仪表与传感器的输入量从零增大到某一值的测试过程称为正行程, 输入量从某一值减少到零的测试过程称为反行程。图1-3-3为迟滞误差。

很明显, 在具有同一输入量的条件下, 正、反

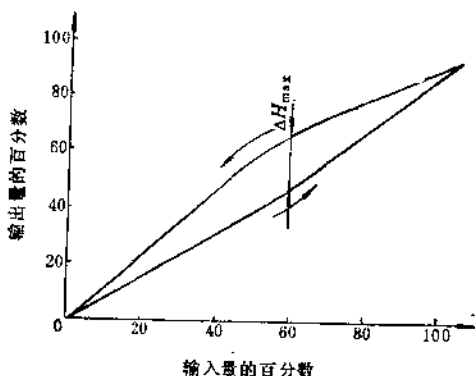


图1-3-3 迟滞误差

行程的输出量是不同的, 其差值便是迟滞误差值。在全量程中最大的迟滞差值与满量程输出值之比作为迟滞误差的技术指标, 即迟滞误差为

$$H_y = \frac{\Delta H_{\text{max}}}{Y_m} \times 100\% \quad (1-3-5)$$

在多次重复测试时, 分别计算出正反行程的各个输出量的平均值, 并用这些平均值去计算迟滞误差, 选最大的迟滞误差值  $\Delta_{\text{max}}$  来计算迟滞误差指标。

### 6. 重复性

多次重复测试时, 即使全是正行程, 或同是反行程, 对于同一输入量, 其输出量也有些不同。这种差值称为重复误差值, 如图1-3-4所示。

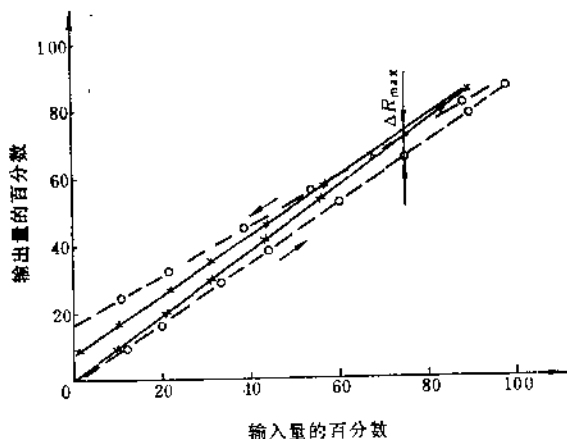


图1-3-4 重复性

有的书上介绍, 也有用全量程中最大的重复误差值  $\Delta R_{\text{max}}$  与满量程输出之比的百分数作为重复性指标, 即



$$R_N = \frac{\Delta R_{m \max}}{Y_m} \times 100\% \quad (1-3-6)$$

应当指出重复误差不同，精密度指标是不合理的。因为按这种做法，测试次数越多，重复误差值就可能越大。

重复性是衡量偶然误差的一个指标，所以采用

种种原因，输入与输出的关系并不是完全线性的。一般线性度是指标准曲线和理论直线的接近程度，称为线性度。

一般采用标定的实际特性曲线与理论直线之间的最大偏差 $\Delta L_{\max}$ 与满量程输出值 $Y_m$ 之比的百分数作为线性度，即

表1-3-14  $y_i, \hat{y}_i$  数据表

$y_i$	21.1	37.5	53.8	70.6	86.6	103.6	118.7
$\hat{y}_i$	21.2	37.6	53.9	70.3	86.6	103.0	119.2
$y_i - \hat{y}_i$	-0.1	-0.1	-0.1	0.3	0	0.6	0.5

标准残差  $s_i$  占满量程的多少值, 即为线性度。

$$\text{线性度} = \frac{\text{标准残差}}{\text{满量程}}$$

其特性曲线如图1-3-5所示。

将表1-3-14中数值代入式(1-3-13)求出  $s_i$

$$s_i = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}}{N - q} = \sqrt{\frac{0.73}{5}} = 0.382$$

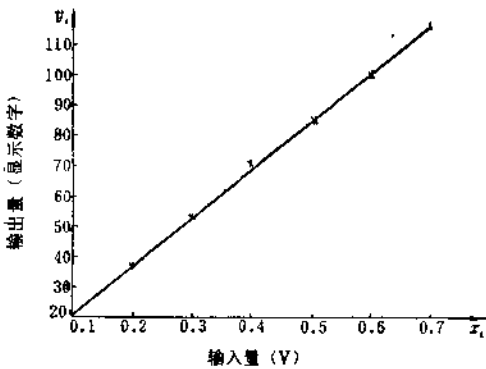


图1-3-5 线性度

$$\text{线性度} = \frac{0.382}{127} = 0.3\%$$

### 8. 符合度

所谓符合度是指传感器的实际输出特性和理论函数特性之间的符合程度。符合度是用实际函数特性和理论函数特性之间的最大偏差与传感器的最大输出之比的百分数来表示的, 即

$$\delta = \frac{\Delta Y_m}{Y_m} \times 100\% \quad (1-3-14)$$

式中,  $\Delta Y_m = (Y_p - Y_y)_{max}$  为实际函数特性和理论函数特性之间的最大偏差。

图1-3-6所示为一传感器的特性曲线, 其中实线表示传感器的理论函数特性曲线, 具有“×”字

的曲线则为实验值特性曲线。两曲线比较, 它们之间的最大偏差  $\Delta Y_{max}$  除以满量程输出的百分数便是符合度的技术指标。

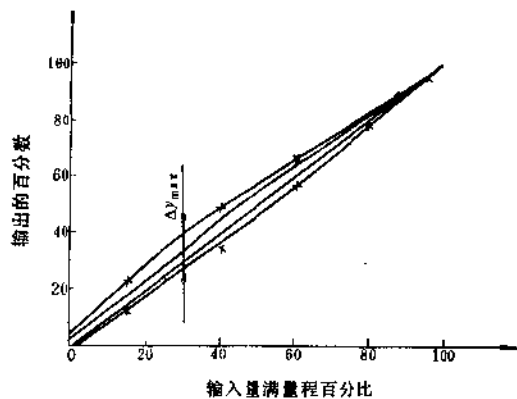


图1-3-6 理论曲线的符合度

### 9. 误差带

仪表与传感器各点的允许误差常用误差带来表示。例如, 常值允许误差, 即在全量程范围内允许误差为常值, 其误差带如图1-3-7a所示。允许误差值随输入量  $x$  增大而成比例地增大的, 称为比例允许误差, 如图1-3-7b所示。在全量程范围内分段规定一定的常值允许误差, 这种分段常值允许误差的误差带如图1-3-7c所示。也有某一段规定常值允许误差, 而另段规定比例允许误差, 这种误差带如图1-3-7d所示。

规定误差带就可以不考虑各种误差的分指标。

### 10. 稳定度

稳定度表示传感器在一般较长时间内保持其性能参数的能力。一般以室温条件下经过一个规定时间后, 传感器的输出与起始标定时的输出差异程度来表示其稳定性, 如图1-3-8所示。

图1-3-8所示为遥测系统稳定性试验, 在起始时间给系统以  $0 \mu s$ , 加载到  $1000 \mu s$  的标准信号, 经4h后其标准值的最大偏差变化被满量除得相对

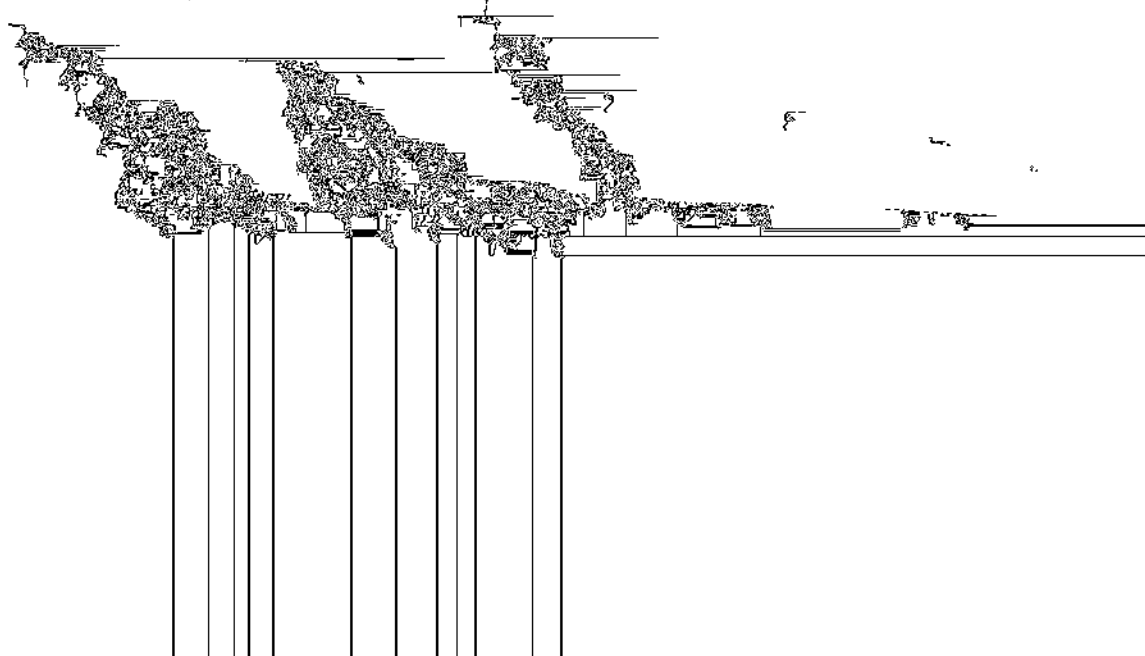
表1-3-15 典型环节

环节名称	放大环节	非周期环节	一阶微分环节
微分方程	$x_2 = Kx_1$ ①	$T \frac{dx_1}{dt} + x_1 = Kx_2$	$x_2 = K \left( \tau \frac{dx_1}{dt} + x_1 \right)$
算子形式的微分方程	—	$(TP+1)x_1 = Kx_2$	$x_2 = K(\tau P+1)x_1$
传递函数	$W(s) = K$	$W(s) = \frac{K}{Ts+1}$	$W(s) = K(\tau s+1)$
幅相频率特性	$W(j\omega) = K$	$W(j\omega) = \frac{1}{Tj\omega+1}$	$W(j\omega) = K(\tau j\omega+1)$
幅频特性	$K$	$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{1+(T\omega)^2}}$	$A(\omega) = K\sqrt{1+(\tau\omega)^2}$
相频特性	$0$	$\varphi(\omega) = -\text{tg}^{-1}T\omega$	$\varphi(\omega) = \text{tg}^{-1}\tau\omega$
对数频率特性			

①  $x_1$  为输入量,  $x_2$  为输出量。

的方程式与特性

振荡环节	二阶微分环节	积分环节	理想的微分环节
$\frac{d^2 x_2}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dx_2}{dt} + \omega_n^2 x_2 = Kx_1$	$K\left(\tau^2 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + 2\zeta\tau \frac{dx_1}{dt} + x_1\right)$	$\frac{dx_2}{dt} = Kx_1$	$x_2 = K \frac{dx_1}{dt}$
$(P^2 + 2\zeta\omega_n P + \omega_n^2)x_2 = Kx_1$	$x_2 = K(\tau^2 P^2 + 2\zeta\tau P + 1)x_1$	$Px_2 = Kx_1$	$x_2 = KP x_1$
$W(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$	$W(s) = K(\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1)$	$W(s) = \frac{K}{s}$	$W(s) = KS$
$W(j\omega) = \frac{K}{\omega_n^2 - \omega^2 + j(2\zeta\omega\omega_n)}$	$W(j\omega) = K(1 - \tau^2\omega^2 + 2j\zeta\tau\omega)$	$W(j\omega) = \frac{K}{j\omega}$	$W(j\omega) = Kj\omega$
$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega\omega_n)^2}}$	$A(\omega) = K\sqrt{(1 - \tau^2\omega^2)^2 + (2\zeta\tau\omega)^2}$	$A(\omega) = \frac{K}{\omega}$	$A(\omega) = K\omega$
$\varphi(\omega) = -\text{tg}^{-1} \frac{2\zeta\omega\omega_n}{\omega_n^2 - \omega^2}$	$\varphi(\omega) = \text{tg}^{-1} \frac{2\zeta\tau\omega}{1 - \tau^2\omega^2}$	$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$	$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2}$





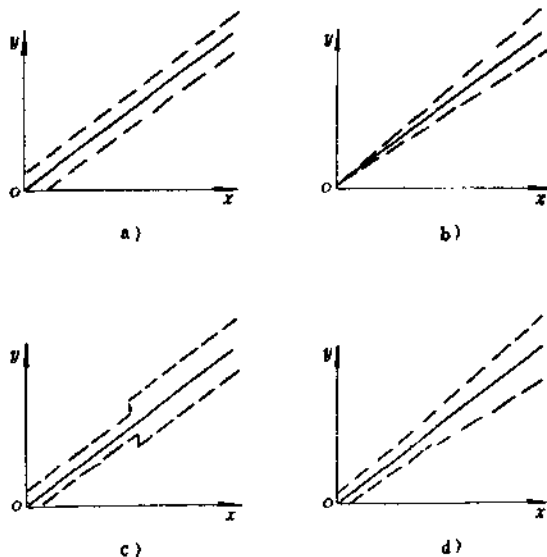


图1-3-7 几种误差带

- a) 常值允许误差的误差带    b) 比例允许误差的误差带    c) 分段常值允许的误差带  
d) 常值与比例分段允许的误差带

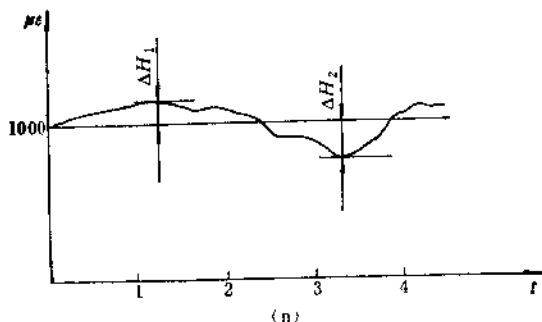


图1-3-8 稳定性

偏差。其数学表达式为

绝对偏差：最小 $\mu s$ 发生在1.5h为 $\Delta H_2$ ；

绝对偏差：最大 $\mu s$ 发生在3.5h为 $\Delta H_1$ 。

变的条件下零输出的变化。对于有源传感器是指在标准电压条件下，零输出的变化情况。

### (2) 温度漂移

绝大多数传感器在温度变化时特性会有所变化。一般用零点温漂和灵敏度温漂来表示这种变化程度，即温度每变化 $1^\circ\text{C}$ 时零点输出的变化值。可用变化值本身表示，也可用变化值与满量程输出之比来表示。

### (三) 传感器的主要动特性及技术指标

#### 1. 概述

动态标定实验数据处理的任务与静态相似，主要有两个方面的任务。首先根据一个动态标定实验的结果求出它的近似的数学模型来描述传感器的动特性，其次是求出它的动态技术指标。

器及测试系统的幅频特性曲线如图1-3-9所示。

当被测信号的频率小于 $\omega_1$ 时,这个测量系统能准确地反映被测信号。当被测信号的频率在 $\omega_2$ 附近时,这个测量系统所测出的信号远远大于真实信号。同理,在 $\omega_3$ 附近时,这个测量系统测出的信号远远小于真实信号。所以如果在动态测量时不注意系统的动特性,将带来很大的误差。

传感器与仪表的动态特性在各种自动控制原理等文献上均有,这里不详述,仅用表1-3-15表示。

各种传感器和系统均由一些典型环节组成。表1-3-15概括了常用的一些典型环节的微分方程、传递函数、幅相频率特性、幅频特性、相频特性、对数幅频特性等。下面分别讨论系统动态性能指标和计算方法。

### 2. 时域动态性能指标

表征时域动态性能指标,一般都用过渡过程曲线上的特性参数来表示。

#### (1) 一阶系统

图1-3-10示出了典型的一阶非周期系统的阶跃过渡过程曲线,在此曲线上有几个特性时间的点。从零输出达到稳态值 $U(\infty)$ 的63%所需的时间 $T$ ,称为时间常数,这是最常用的。输出达到稳态值的95%或98%所需的 $T_2$ 和 $T_3$ ,称为响应时间。输出从某一个小值(例如只是稳态值的5%或10%)达到稳态值的90%所需的时间,称为上升时间 $t_r$ 。输出时间到达稳定值的50%所需要的时间称为半值时间 $t_{0.5}$ 。

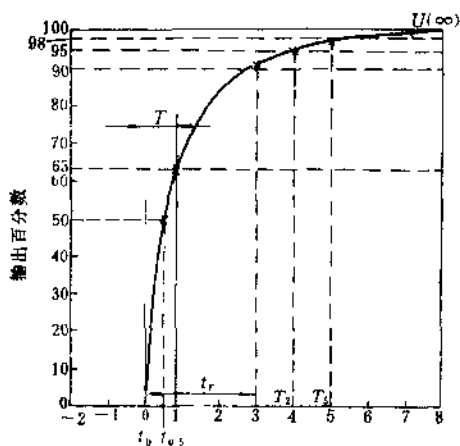


图1-3-10 一阶系统阶跃过渡过程的几个特征时间

对于一阶非周期传感器及仪表,其技术指标的固定关系为 $T_3 = 5T$ ,  $T_2 = 4T$ 。对于二阶非周期的仪表和传感器,也常用响应时间 $T_2$ 或 $T_3$ 作时域的动态性能指标之一。

对于一阶非周期系统,其上升时间与时间常数有如下关系。

单位阶跃过渡过程的方程为

$$x(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{T}\right) \quad (1-3-16)$$

根据前面所说的上升时间的定义确定,如图1-3-11所示的 $x_1$ 与 $x_2$ 值。将 $t_1$ 与 $t_2 = t_1 + t_r$ 代入上式,得

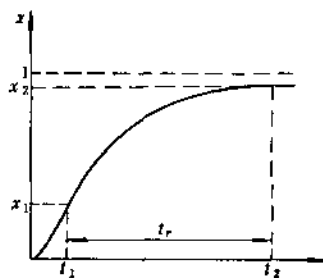


图1-3-11 上升时间

$$x_1 = x(t_1) = 1 - \exp\left(-\frac{t_1}{T}\right)$$

$$x_2 = x(t_2) = 1 - \exp\left(-\frac{t_2}{T}\right)$$

$$= 1 - \exp\left(-\frac{t_1 + t_r}{T}\right)$$

所以 
$$\frac{1-x_1}{1-x_2} = \exp\left(-\frac{t_r}{T}\right)$$

两边取自然对数,得

$$\ln\left(\frac{1-x_1}{1-x_2}\right) = -\frac{t_r}{T}$$

$$T = -\frac{t_r}{\ln\left(\frac{1-x_1}{1-x_2}\right)}$$

如果取  $x_1 = 0.05$ ,  $x_2 = 0.9$ ,  $\ln\left(\frac{1-0.05}{1-0.9}\right) = 2.25$

则 
$$T = \frac{t_r}{2.25}$$

故一阶非周期系统的上升时间 $t_r$ 与时间常数有

确定的关系。同理, 如  $x_1 = 0.1$ ,  $x_2 = 0.9$ , 则  $T = \frac{t_2}{2.2}$

半值时间  $t_{0.5}$  与时间常数的关系如下, 即当  $t = 0.7T$  时, 则有

$$x(t) = x(0.7T) = 1 - e^{-0.7} = 1 - 0.4966 \approx 0.5$$

故输出值达到稳态值的 50% 所需的时间  $t_{0.5}$  与时间常数的关系为

$$T = \frac{t_{0.5}}{0.7}$$

所以对一阶非周期系统给出上升时间  $t_r$  或半值时间  $t_{0.5}$ , 都可换算成时间常数和响应时间。

这样一来五个特征时间  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_s$ 、 $t_r$ 、 $t_{0.5}$  都有固定的关系, 都可以互相换算。

它们的换算关系为

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{5} T_s = \frac{1}{4} T_2 = \frac{t_r}{2.25} \\ &= \frac{1}{0.7} t_{0.5} \end{aligned} \quad (1-3-17)$$

若有超调和衰减振荡的二阶系统, 则不是这么简单的关系。

在阶跃过渡过程或回零过渡过程曲线上, 算出时域动态性能指标。对于理想的线性系统, 做阶跃过渡过程或回零过渡过程时, 其阶跃值的大小不同, 过渡过程曲线也是有些不同的。这是因为仪表和传感器的功率是有限的, 所以过渡过程试验应保

传感器中, 都规定出当信号小于某一定值数据时的通频带值。所以, 在比较两个仪器仪表与传感器的动态性能指标时, 所加的阶跃值应该相同。应该在线性范围内测试其动特性。

有的测试系统是由几个测量环节组成, 其中某个环节可能出现如图 1-3-12 所示的特性。当输入信号  $x < x_1$  时, 它具有线性特性; 当信号  $x > x_1$  时, 输出在  $y_1$  处饱和, 如图上实线所示。当  $x > x_1$  输出逐渐饱和, 如图上虚线所示, 对于一般开环传感器也有一个类似的线性范围。用于动态测试的传感器, 其线性范围愈宽愈好。

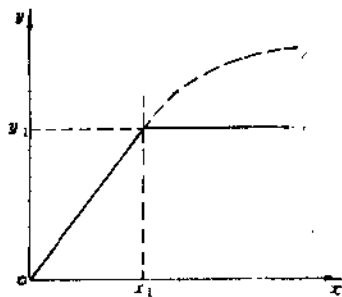


图 1-3-12 饱和特性

## (2) 二阶系统

图 1-3-13 所示为二阶系统各种时域性能指标的单位阶跃过渡过程曲线。其半值时间  $t_{0.5}$ 、响应时间  $T_s$  或  $T_2$  都和前面的定义相同。上升时间  $t_r$  的定义为: 从稳态值 10% 上升到 90%。从稳态值 5%

升时间。对于欠阻尼的二阶系统,通常采用0~100%的上升时间 $t_1$ ,对于过阻尼系统,通常采用10%~90%的上升时间。峰值时间 $t_p$ 为从零到达超调的第一个峰值所需的时间。最大超调 $\sigma\%$ 与响应时间 $T_2$ 或 $T_s$ 和振荡次数 $N$ 是这类仪表与传感器常用的时域性能指标。也有用衰减率 $d = A_1/A_2$ 或对数衰减率 $D = \ln d$ 和过渡过程振荡周期 $T$ 或频率 $f_s = 1/T$ 的,如图1-3-14所示。

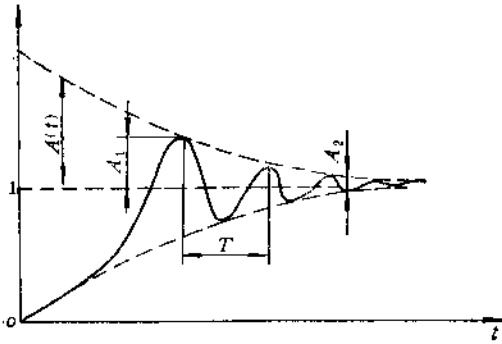


图1-3-14 衰减振荡过渡过程曲线的特征值

图1-3-14所示衰减振荡过渡过程曲线的包络线方程为

$$A(t) = a \exp(-\alpha t) \quad (1-3-18)$$

式中,  $a = 1/\sqrt{1-\xi^2}$ ;  $\alpha = \xi\omega_n$ 。

在曲线上过渡过程相差一个周期 $T$ 的两个峰值 $A_1$ 与 $A_2$ 之比为衰减率,即

$$d = \frac{A_1}{A_2} = \frac{a \exp(-\alpha t)}{a \exp[-\alpha(t+T)]} = e^{\alpha T} \quad (1-3-19)$$

对数衰减率为

$$D = \ln d = \alpha T \quad (1-3-20)$$

将减幅系数 $a = \xi\omega_n$ 、振荡周期 $T = 2\pi/\omega_d$ 、固有频率 $\omega_n = \omega_d/\sqrt{1-\xi^2}$ 代入上式,得

$$D = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (1-3-21)$$

超调量 $\sigma$ 与阻尼比的关系为

$$\sigma = \exp\left[-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right] = \exp(-D/2)$$

将上式取自然对数得

$$\ln \sigma = -\frac{D}{2}$$

$$D = -2 \ln \sigma$$

因为  $D = \ln d \quad (1-3-22)$

故  $\sigma = \frac{1}{\sqrt{d}} = \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \quad (1-3-23)$

上述各式便是超调量 $\sigma$ ,对数衰减率 $D$ ,衰减率 $d$ 三者的换算公式。

过渡过程振荡周期 $T$ 与响应时间 $T_2$ 或 $T_s$ 的换算关系如下。

在阶跃信号作用下,输出量达到95%与98%所需的时间 $T_s$ 与 $T_2$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} T_s &= \frac{5}{\xi\omega_n} = \frac{5T}{D} \\ T_2 &= \frac{4}{\xi\omega_n} = \frac{4T}{D} \end{aligned} \right\} \quad (1-3-24)$$

对于超调量很小的仪表与传感器,在时域动态标定曲线上, $\sigma$ 与 $T_2$ 或 $T_s$ 都不易量准确。这时改用峰值时间 $t_p$ 与0%~100%的上升时间 $t_1$ 。过渡过程振荡频率 $\omega_d$ 与峰值时间 $t_p$ 的关系为

$$t_p = \frac{T_1}{\omega_d} = \frac{T_2}{2} \quad (1-3-25)$$

即峰值时间为过渡过程振荡周期 $T$ 的一半,上升时间 $t_1$ 为

$$t_1 = \frac{\pi - \beta}{\omega_d} \quad (1-3-26)$$

式中, $\beta$ 如图1-3-15所示。

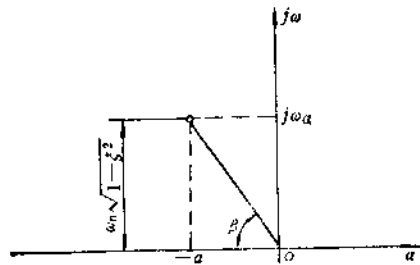


图1-3-15 在复平面上 $\beta$ 的意义

$$\left. \begin{aligned} \cos \beta &= \xi \\ \xi &= \cos^{-1} \beta \end{aligned} \right\} \quad (1-3-27)$$

由 $t_p$ 可推算出 $\omega_d$ ,由 $\omega_d$ 与 $t_1$ 可算出 $\beta$ 值,由 $\beta$ 值可算出 $\xi$ 。由 $\xi$ 、 $\omega_d$ 可算出 $\omega_n$ ,其值为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_d}{1-\xi^2}} \quad (1-3-28)$$

求出 $\xi$ 、 $\omega_n$ 之后,上述各项技术指标就可以算出来了。

### 3. 频域动态性能指标

频域的动态性能指标中应用最广的是通频带

$\omega_b$ 。对于仪表及传感器较实用的是工作频带  $\omega_g$ ，也即是幅值误差为  $\pm 5\%$  或  $\pm 10\%$  的两种工作频带  $\omega_{g2}$  或  $\omega_{g1}$ ，如图1-3-16所示。

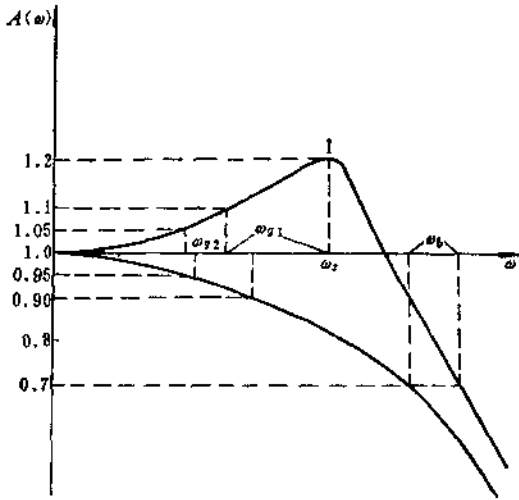


图1-3-16 频域的各种特征值

4. 时域与频域两种性能指标的关系

(1) 定性关系 时域的指标与频域的指标近似地有反比的关系。粗略地说，频带宽几倍，响应时间就快几倍。例如，两个系统的频率特性曲线很相似，系统1的频带是系统2的频带的3倍，此时可以近似地认为1的响应时间只是系统2的响应时间的  $\frac{1}{3}$ ，如图1-3-17及图1-3-18所示。

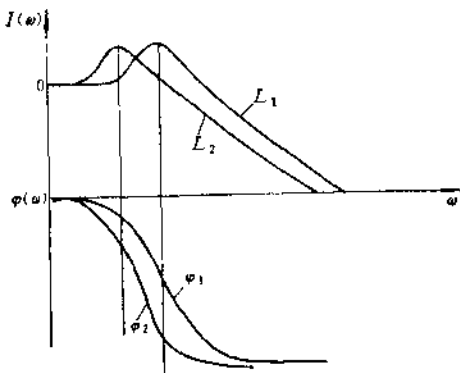


图1-3-17 两个系统的频率特性

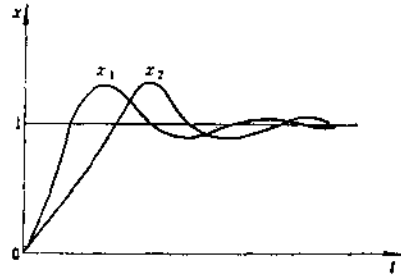


图1-3-18 两个系统的阶跃响应

这就是说，两个系统的频率特性分别为  $\omega_1(j\omega)$  与  $\omega_2(j\omega)$ ，而且  $\omega_1(j\omega) = \omega_2(j\omega)$ ，则在同一单位阶跃作用下，这两个系统输出信号  $x_1(t)$  与  $x_2(t)$  之间的关系为

$$x_1(t) = x_2\left(\frac{t}{n}\right) \quad (1-3-29)$$

(2) 一阶系统两种指标的定量关系 一阶系统的频带一般表达式为

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+T^2\omega^2}} = \eta \quad (1-3-30)$$

$$\omega = \frac{\beta}{T}$$

$$\text{式中 } \beta = \left(-\frac{1}{\eta^2} - 1\right)^{\frac{1}{2}}$$

幅值误差  $\Delta A = 1 - \eta$ 。当  $\eta = 0.707$  时， $B = 1$ ， $\omega_b = \frac{1}{T}$  为常用的通频带。当  $\eta = 0.9$  时， $B = 0.485 \approx 0.5$ ，

$$\omega_{g1} = \frac{0.485}{T} \approx \frac{0.5}{T} = \frac{1}{2} \omega_b \quad (1-3-31)$$

为幅值误差小于10%的工作频带。对应这工作频带，对数幅频特性曲线上  $L(\omega_{g1}) = -0.914\text{dB}$ ，当  $\eta = 0.95$  时， $B = 0.329$ ，

$$\omega_{g2} = \frac{0.329}{T} = \frac{\omega_b}{3} \quad (1-3-32)$$

为幅值误差小于5%的工作频带。这时  $L(\omega_{g2}) = -0.446\text{dB}$ 。

这两种工作频带内的相角，由相频公式可算出。

$$\begin{aligned} \varphi(\omega_{g1}) &= -\arctg\left(T_s \frac{0.485}{T}\right) \\ &= -25^\circ 53' \end{aligned}$$



表1-3-16 各种幅值误差 $\Delta A$ 的 $\omega_g$ 与 $\phi_g$

$\eta$	0.99	0.98	0.97	0.95	0.9	0.707
$\Delta A$	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1	0.293
$\omega_g/\omega_b$	0.1425	0.203	0.251	0.329	0.485	1
$\varphi(\omega_g)$	-8°6.6'	-11°28.5'	-14°5.4'	-18°13'	-25°50'	-45°
$L(\omega_g)$	-0.0873	-0.175	-0.265	-0.446	-0.914	-3

$$\varphi(\omega_{g2}) = -\arctg\left(T_x \frac{0.329}{T}\right) = -18^\circ 13'$$

对于 $\Delta A$ 为其它值时的 $\omega_g$ 与 $\phi_g$ 列表于1-3-16中。

$$T = \frac{1}{\omega_g} - \text{tg}\phi_g \quad (1-3-33)$$

响应时间 $T_s$ 与 $T_2$ 和时间常数 $T$ 有简单关系,故响应时间与工作频带的换算公式为

$$\omega_{g1} = \frac{3 \times 0.485}{T_s} = \frac{1.455}{T_s} \quad (1-3-34)$$

$$\omega_{g2} = \frac{3 \times 0.329}{T_s} = \frac{0.985}{T_s}$$

有了前面这些关系式,对于一阶系统,时域与频域两种动态性能指标都可以互相换算。

(3)二阶系统两种指标的定量关系 对于二阶系统,由时域的指标 $\sigma$ ,  $T_s$ 或 $T_d$ 换算成频域的指标

计算出来的 $(\omega_x/\omega_n) = f(\xi, \Delta A)$ 的曲线族如图1-3-20所示。

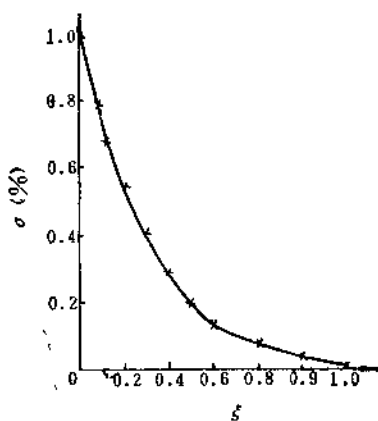


表1-3-17 各种幅值误差 $\Delta A$ 对应的 $\Delta c$ 值

$\Delta A$	0.1	0.05	0.03	0.02	0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.05	-0.1
$\Delta c$	0.173	0.093	0.0574	0.0388	-0.0197	-0.0203	-0.0412	-0.0628	-0.108	-0.235

由图1-3-20可以看出, 每条曲线都是分两段, 两段曲线分段点的 $\xi$ 值为

$$\xi_1 = \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \sqrt{c})} \quad (1-3-38)$$

该式只适用于计算两段曲线分段点左端点的 $\xi_1$ , 不适用于其余各处, 与 $\xi_1$ 相对应的 $\omega_g/\omega_n$ 为

$$\frac{\omega_g}{\omega_n} = \sqrt{1 - 2\xi_1^2} \quad (1-3-39)$$

对应于各种 $\Delta A$ 的各条曲线的分段点上的 $\xi_1$ 与对应的 $(\omega_g/\omega_n)_l$ 由式(1-3-38)和式(1-3-39)算出, 如表1-3-18所示。

表1-3-18 各种幅值误差 $\Delta A$ 所对应的几个特征量

$\Delta A$	0.1	0.05	0.03	0.02	0.01
$c$	0.173	0.093	0.0574	0.0388	0.0197
$\xi_1$	0.54	0.589	0.616	0.634	0.656
$(\omega_g/\omega_n)_l$	0.645	0.552	0.491	0.444	0.374
$\xi_r$	0.55	0.60	0.62	0.64	0.66
$(\omega_g/\omega_n)_r$	1.01	0.842	0.756	0.673	0.566

表中 $(\omega_g/\omega_n)_l$ 是各条曲线分段点在左段曲线最右边的值。 $(\omega_g/\omega_n)_r$ 是各条曲线右半段曲线上接近最左边的值, 它们对应的 $\xi$ 比 $\xi_1$ 稍大一些。在计算时, 当 $\xi < \xi_1$ 时, 式(1-3-37)根号外面取负号, 在 $\xi > \xi_1$ 时, 取正号。

由图1-3-20可以看出, 对于阻尼很小的传感器来说, 幅值误差为10%、5%、1%的工作频带近似地为固有频率的1/3、1/5、1/10。

通频带 $\omega_b$ 与固有频率 $\omega_n$ 之比与阻尼比 $\xi$ 的关系为

$$\omega_b = \omega_n \left[ (1 - 2\xi^2) + \sqrt{(1 - 2\xi^2)^2 + 1} \right]^{1/2} \quad (1-3-40)$$

图1-3-21是由这式计算出来的曲线。

对应于工作频带的相角与工作频带和固有频率之比 $\omega_g/\omega_n$ 的关系为

$$\varphi(\omega_g) = -\arctg \frac{2\xi\omega_g/\omega_n}{1 - (\omega_g/\omega_n)^2} \quad (1-3-41)$$

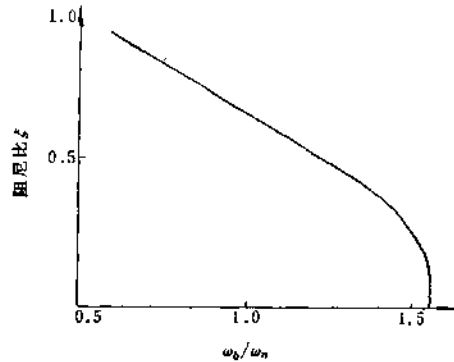


图1-3-21 典型二阶系统阻尼比与通频带和固有频率之比的关系曲线

(1-3-41)

有了这些关系, 由时域的指标换算成频域指标便可按下列步骤进行。

- 1) 由超调量 $\sigma$ 查出阻尼比 $\xi$ ;
- 2) 用 $T_z$ 和 $T_s$ 从式(1-3-36)便可算出 $\omega_n$ ;
- 3) 由 $\xi$ 从图1-3-20查出 $\omega_g/\omega_n$ 便可算出 $\omega_g$ ;
- 4) 由 $\xi$ 从图1-3-21查出 $\omega_b/\omega_n$ , 便可算出 $\omega_b$ ;
- 5) 将 $\omega_g$ 与 $\omega_n$ 代入式(1-3-41)便可算出 $\varphi(\omega_g)$ 。

下面介绍由频域指标 $\omega_{g1}$ 与 $\omega_{g2}$ 换算时域指标 $\sigma$ 与 $T_z$ 或 $T_s$ 的方法。

将 $c_1$ 对应于 $\omega_{g1}$ 与 $c_2$ 对应于 $\omega_{g2}$ , 分别代入式(1-3-37), 经整理后得

$$\begin{cases} \left( \frac{\omega_{g1}}{\omega_n} \right)^4 - 2 \left( \frac{\omega_{g1}}{\omega_n} \right)^2 (1 - 2\xi) + c_1 = 0 \\ \left( \frac{\omega_{g2}}{\omega_n} \right)^4 - 2 \left( \frac{\omega_{g2}}{\omega_n} \right)^2 (1 - 2\xi) + c_2 = 0 \end{cases}$$

解二联立方程式得

$$\omega_n^2 = \omega_{g1}\omega_{g2} \sqrt{\frac{1 - E^2}{c_2 - c_1 E^2}} \quad (1-3-42)$$

$$\xi = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( -\frac{1}{E} \sqrt{\frac{c_2 - c_1 E^2}{1 - E^2}} + c_1 E \sqrt{\frac{1 - E^2}{c_2 - c_1 E^2}} \right)^2 \right]} \quad (1-3-43)$$

式中  $E = \frac{\omega_{E2}}{\omega_{R1}}$ 。

路所包括的内容取决于传感器的电特性和信号的用途。通常应考虑以下几方面。

有了上述关系式可以计算电路的阻抗和功率因数。(一)传感器的阻抗和信号用途



最优秀的传感器。这些问题明确后就可以选择传感器和测量装置，然后再考虑接口电路及系统的技术

的电路图上未表示出来的问题，这些问题是很重要的，在进一步考虑电路元件、电路和系统应用之

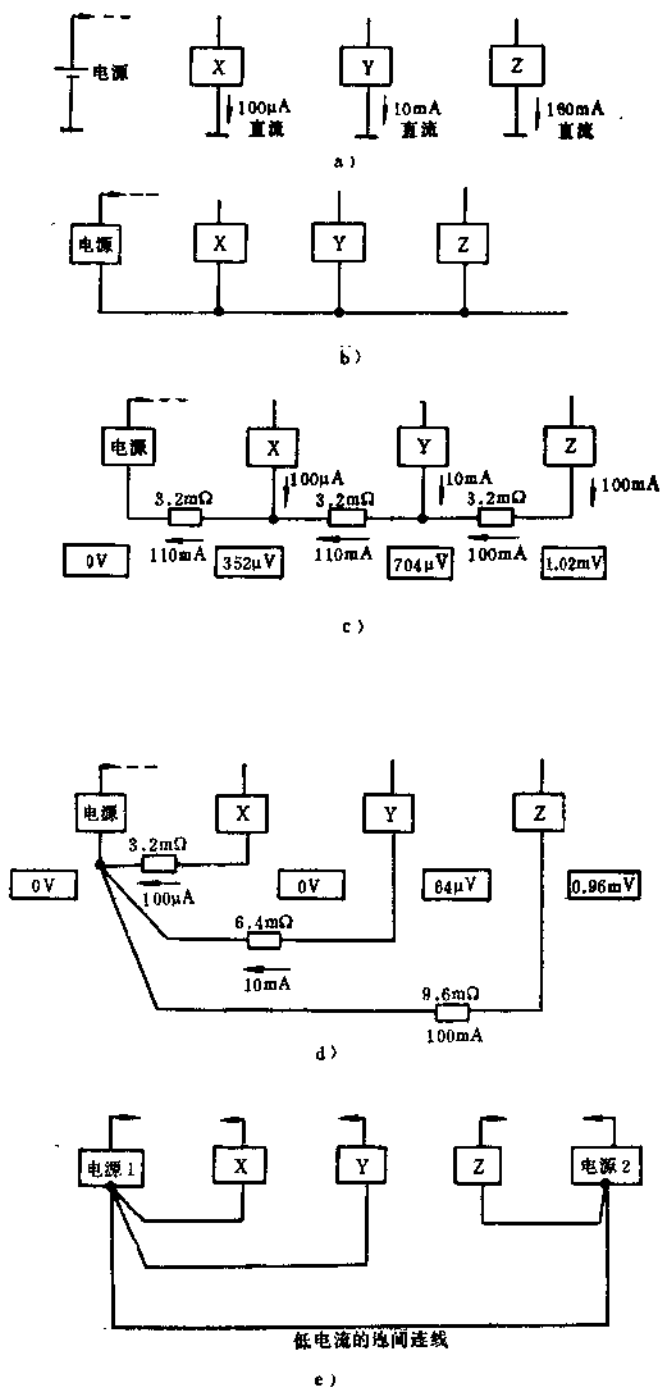


图1-3-23 接地举例

a)基本电路 b)绘制的原理电路图 c)15cm长导线连接的电路(每个“地点”的电压如图所示)  
 d)单点接地的电路 e)电路Z分开供电



中应当尽量少用。例如在运算放大器电路中，增益开关的端子应该接到高电平的输出端而不要接到相加点。

一般地讲，采用开关、继电器、插接件以及插座等所得到的方便，是以降低可靠性、分辨率、精度和增加噪声为代价的。在许多应用传感器的场合中，电子部件的价格只是总价格中的一小部分，所以采用最佳质量的硬件是值得的。此外可以采用具有很好的电性能、专为传感器连接信号用的插接件。

在标准试验中，采用香蕉插座传送低电平直流信号，是最常用的最典型的插接件。对于大负载条件下应用时，广泛地采用带有螺丝端子的绝缘条。高频插头对于传送高频信号很好，但是对于传送低频信号并不理想。

如图1-3-22b所示，即使是焊锡都可能成为低电平的障碍，因为在焊锡的接点会产生热电动势。在微伏级电平的输入电路中，应该用特殊的热焊锡。

### 2. 地线回路的干扰

“地”这个词已变成包罗各种形式的公共接点，它包括有接到金属外壳或箱体的“地”、接到供电电源低端的“地”以及接到输入和输出信号公共接点的地，在所有的情况下，它们和大地都有千丝万缕的联系。

从图1-3-23中可以看出不注意运用“地”的后果。在图1-3-23a所示的电路原理图中，几部分电路和供电电源的低端，都标有接地的符号，这表明所有的接地符号都处在同一电位上。

图1-3-23b同图1-3-23a的安排一样，电路重新画了一下各接地点，用导线连接，图1-3-23c电路近似于图1-3-23b的接法，而各接地点是用15cm导线连接起来的，每15cm的导线其电阻值约为3.2mΩ。电路Z的低端大约是1mV，小功率电路X的低端是352μV。假如X是一个运算放大器，它的

图1-3-23d的电路实际上已达到图1-3-23a电路的目的，即所有的电路的低端都回到单一的公共“地”点，避免在长导线上共同形成电压降。每一条线都分开返回，地线电流不会混在一起。实际上，单一接地点可以是一块真正的金属块，在公共点提供最低可能的电阻。如果供电电源的压降必须减到最小，则电源“高”端的导线也可按相似的方法接线。

公共线也可以是一根粗的母线，只要母线上的干扰满足低电平的要求即可。这样的母线对于数字电路也是合适的公共地线，最后数字公共“地”线接到模拟的“地”以建立整个系统的公共“地”。

包括多个电源和多个机箱的系统，则需要考虑的更多更全面一些。通常，不管电源是谁供给，所有的线汇到公共点，然后和系统的公共端接在一起，以便工作。例如图1-3-23e，所有+5V的负载都回到+5V的公共低端，所有+15V的负载都回到+15V的公共端，最后用一条导线将公共端连在一起。在多电源系统中要判断试验以确定地线接法，使干扰达到最小值。

数字地线通常有很大的噪声，而且有很大的电流尖峰。所有的模拟公共导线（地）应该和数字公共导线（地）分开走线，然后只是在一点汇在一起，如图1-3-24所示。

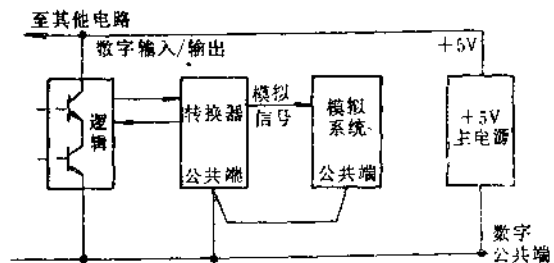
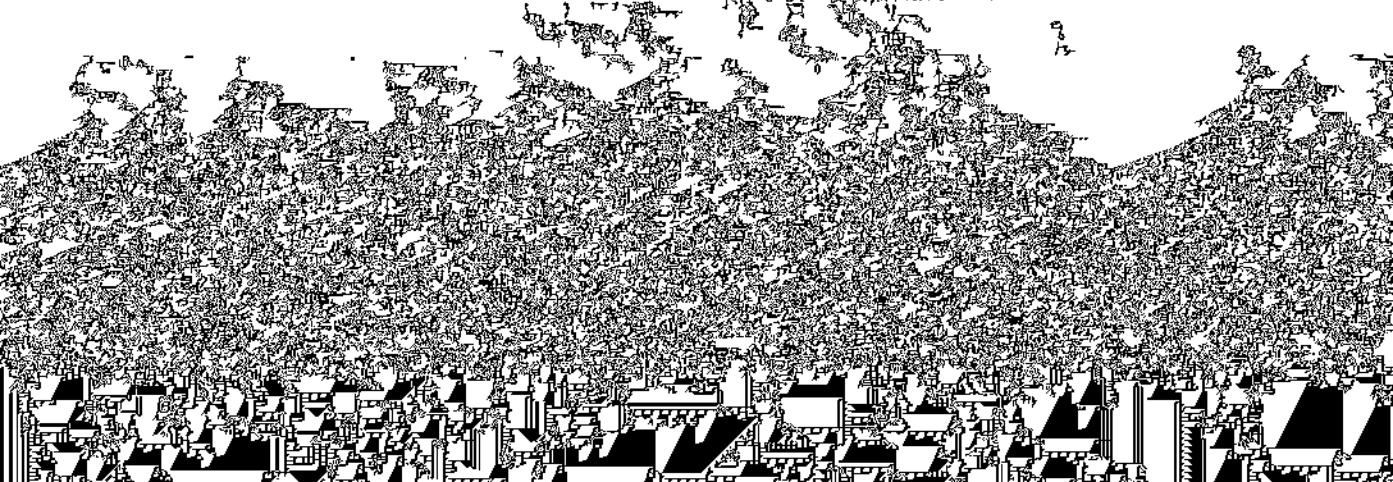


图1-3-24 使模拟和数字地线间的阻抗最小的接法



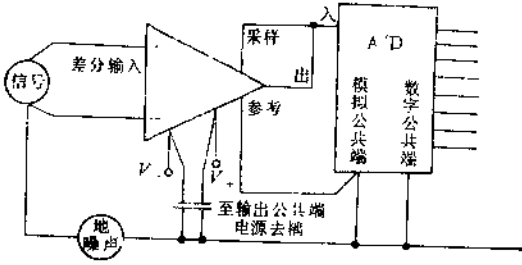


图1-3-25 利用仪器放大器作为分开接地系统的接口

化的交流电压的耦合以及高电平电路通过公共的电源和连线的阻抗产生的瞬态信号。这样的信号的一个可能的耦合途径是由于许多内补偿的集成运算放大器没有动态公共接点（接地点），如图1-3-26所示的积分器输出的参考点接到供电电源的一端，即使地电位很稳定，其输出值仍随电源的波动而波动。

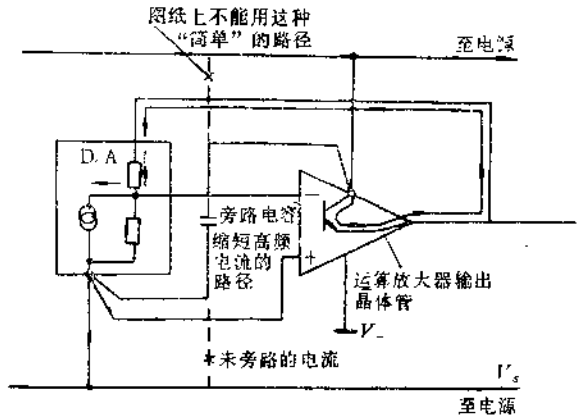
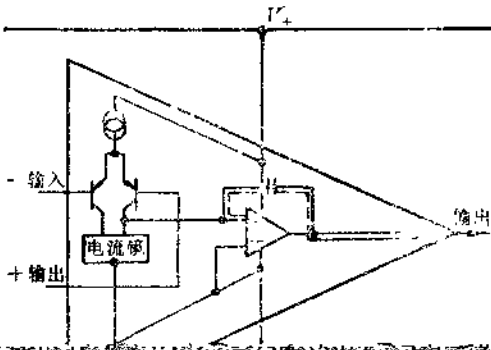


图1-3-27 应用虚地时电源的旁路（箭头表示未旁路的电流）

### 3. 电源频率的干扰

大功率和高频的信号经过分布电容和电感能够耦合到低电平模拟电路。直流高压经过漏电导可以耦合到高阻抗的输入端，适当的布局、屏蔽和防护是可以消除这些干扰的。元件的适当布局包括有在高能量和低能量电路之间以及数字电路和模拟电路之间保持尽可能大的距离，而在低电平的终端之间的连线保证尽可能短的距离等措施。

在很多情况下必须保证静电和电磁屏蔽。电源变压器的干扰是较难解决的。简单的办法是采用屏蔽式变压器。

到处都存在工频干扰，可以采取使环路的面积减到最小、或者使用双绞线以及在低频电路中限制频带等方法去控制工频干扰。电池供电电路尽管和市电隔离，但仍然受到50Hz的干扰。放大器输出

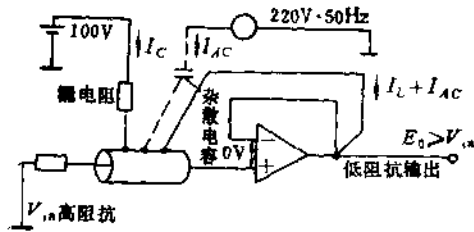


图1-3-28 用于高阻抗单位增益跟随器的输入防护

在放大器的输入端将流入干扰电流  $I_L$  和  $I_{AC}$ ，而在输出端将产生误差。干扰电流值大小为

$$I_L = \frac{100V}{10^{11}\Omega} = 1nA$$

$$I_{AC} = 0.6908\mu A$$

由于在放大器输入端加了防护层，则干扰电流通过防护层流入地，在输出端没有干扰误差。

防护的另一个优点是降低输入电路的电容，外界的杂散电容加到防护层上，而不会引到输入端子上。其次，由于防护层与输入端处于大致相同的电位，在它们之间只有非常小的位电流流过，所以有效的电容实际是零。

## (二) 模拟滤波

### 1. 类型及特点

尽管对降低干扰作了最大的努力，但信号中仍有可能包含不可忽略的噪声。为减少这种不可忽略的噪声，通常采用滤波器。

应当想尽各种方法防止噪声进入系统，如不用滤波器时可采用布线、元件的布局、屏蔽等技术，从工艺上特别重视防止噪声进入系统。万一噪声已经混入接口系统，则可采用滤波以消除噪声。

最有用的接口电路应用的滤波器是低通滤波器，如图1-3-29所示。

图1-3-29表示三种有源滤波器的实现方法。第一种(图1-3-29a)可用于滤波器的输出，是接到高阻抗负载的情况，如接仪器放大器的输入端。图1-3-29b及图1-3-29c是反相运算放大器的变形。图1-3-29c所示滤波器可以有两个独立的时间常数，形成一个两阶低通滤波器。

图1-3-29所示简单RC有源低通滤波器的放大倍数计算如下：

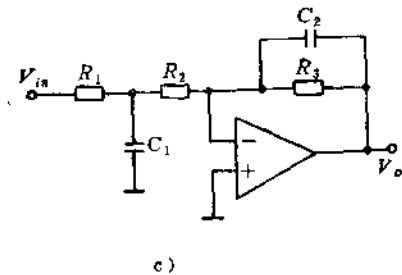
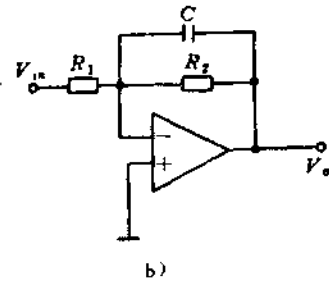
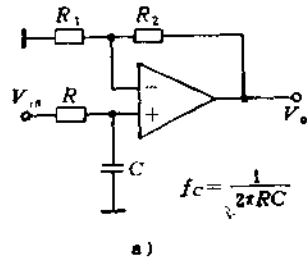


图1-3-29 简单的RC有源低通滤波器

a) 用跟随器消除负载的一阶RC低通滤波器(增益的设置与时间常数RC无关)

b) 反相运算放大器作为一阶RC滤波器(增益由  $R_2/R_1$  决定，时间常数由  $R_1C$  决定。为了独立调节，固定  $R_2$ ，调节  $C$  确定载频，调节  $R_1$  确定增益)

c) 二阶滤波器(具有两个独立可调时间常数)

图1-3-29a为

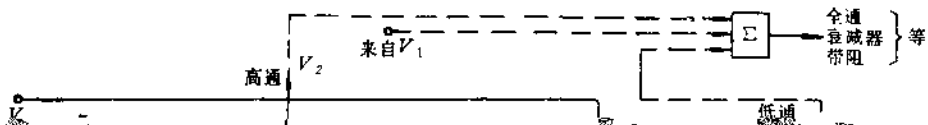
$$\frac{|V_o|}{|V_{i,s}|} = \frac{R_2}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}}$$

图1-3-29b为

$$-\frac{|V_o|}{|V_{i,s}|} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}}$$

图1-3-29c为





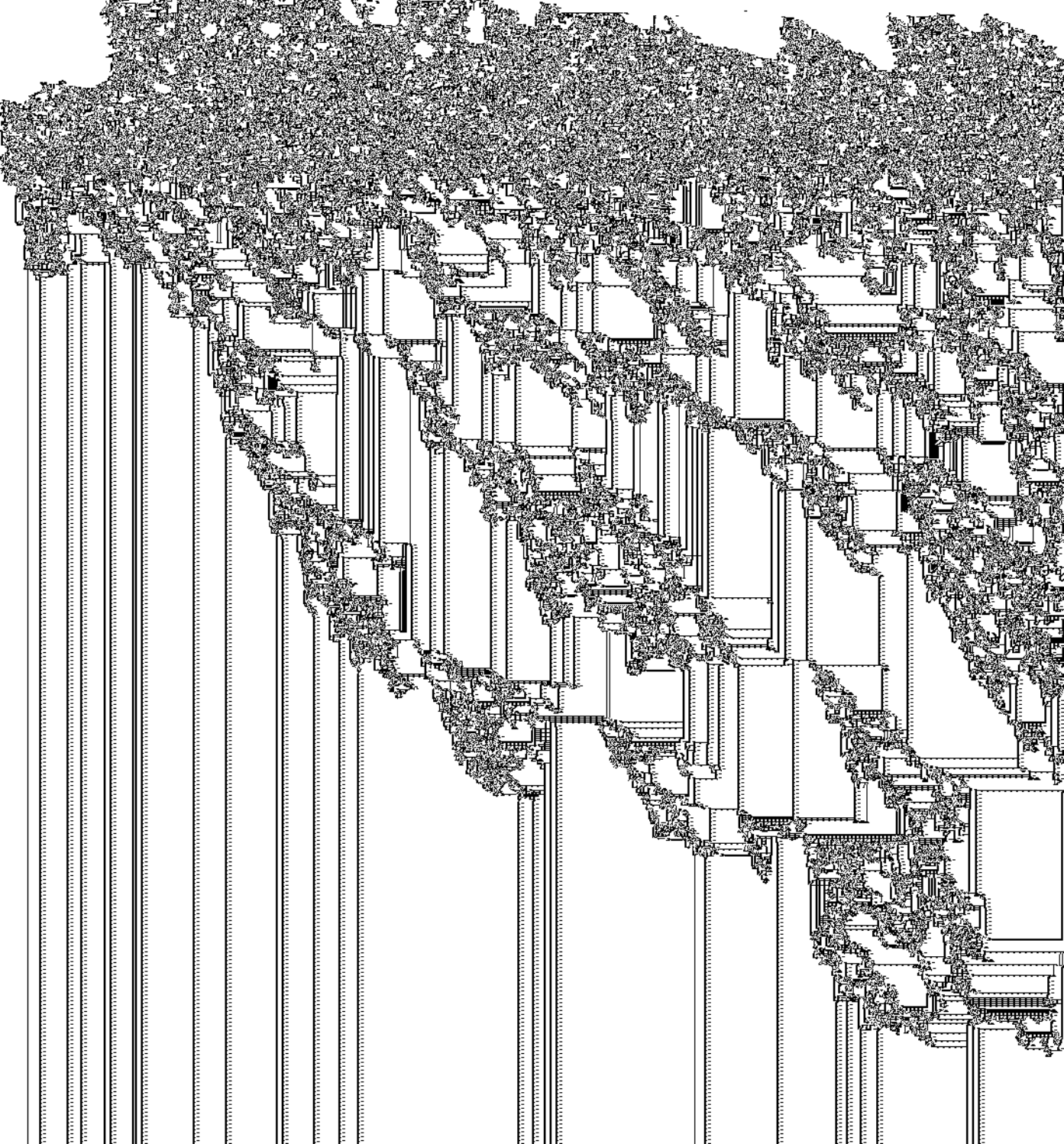


差分放大器用来监控炉温，铂电阻温度计放在炉内，电桥其他各臂放在仪器附近。由于铂电阻温度计靠近炉子附近，所以产生寄生干扰和噪声，为此需用滤波方法消除噪声。

在多通道系统中各通道共用一套仪器放大器和滤波器时，此时要提供程序增益。如果每个通道都含有已知的不同特性的噪声，为了不使更多的研

件，而又要达到最小的扫描时间，则滤波器的时间常数也应该是可以控制的。图1-3-34为这种滤波器的原理系统图。

利用微分控制的低通滤波器如图1-3-35所示，这种滤波器用于阶跃输入变化能快速反应，但为了滤掉低电平的噪声又采取了长时间常数。



---

来做补偿器，对于输出模拟信号的仪表传感器或测



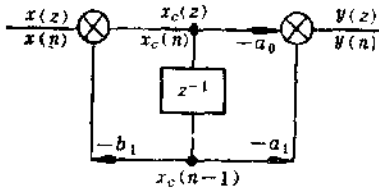


图1-3-39 一阶数字滤波器算法框图

传递函数为

$$W(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}} \quad (1-3-55)$$

与前述的方法相似, 设

$$\frac{x_0(z)}{x(z)} = \frac{1}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}$$

则  $x_0(z) = x(z) - b_1 z^{-1} x_0(z) - b_2 z^{-2} x_0(z)$  (1-3-56)

$$\frac{y(z)}{x_0(z)} = a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}$$

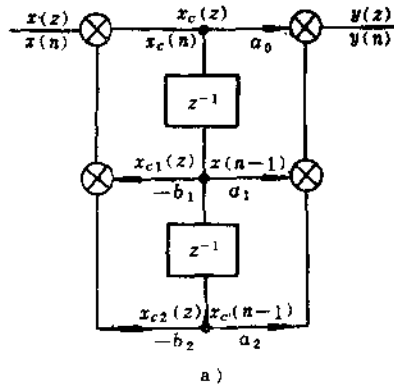
$$y(z) = a_0 x_0(z) + a_1 z^{-1} x_0(z) + a_2 z^{-2} x_0(z) \quad (1-3-57)$$

用差分方程表示时, 相应的两个方程为

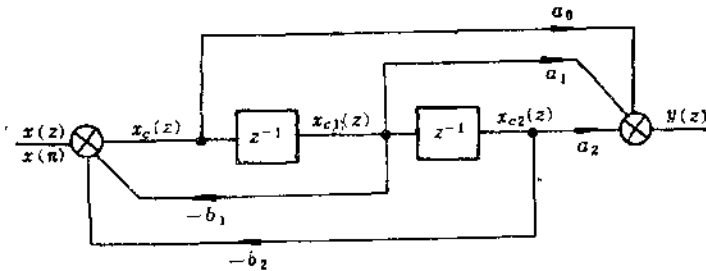
$$x_0(n) = x(n) - b_1 x_0(n-1) - b_2 x_0(n-2) \quad (1-3-58)$$

$$y(n) = a_0 x_0(n) + a_1 x_0(n-1) + a_2 x_0(n-2) \quad (1-3-59)$$

根据式(1-3-56)与式(1-3-57)便可绘出算法框图, 如图1-3-40a所示。



a)



b)

图1-3-40 二阶数字滤波器算法框图的另一种算法  
a)二阶数字滤波器的算法框图 b)二阶数字滤波器算法框图的另一种表示法

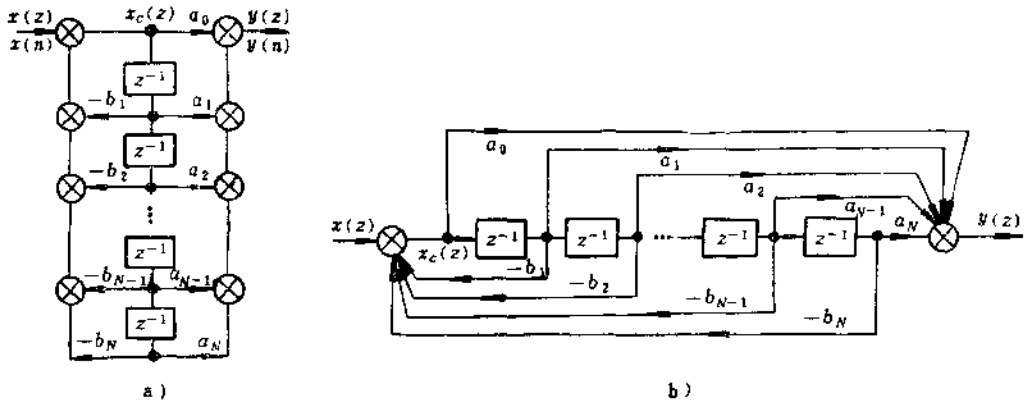


图1-3-41 N阶数字滤波器的算法框图

有的参考资料，将算法框图绘成如图1-3-40b所示的形式。

(3) N阶滤波器 N阶滤波器的离散传递函数为

$$W(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{\sum_{i=0}^N a_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^N b_i z^{-i}} \quad (1-3-60)$$

设  $\frac{x_0(z)}{x(z)} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^N b_i z^{-i}}$

则  $x_0(z) = x(z) + \sum_{i=1}^N b_i z^{-i} x_0(z) \quad (1-3-61)$

$$\frac{y(z)}{x_0(z)} = \sum_{i=0}^N a_i z^{-i}$$

$$y(z) = \sum_{i=0}^N a_i z^{-i} x_0(z) \quad (1-3-62)$$

根据式(1-3-61)和式(1-3-62)可绘出算法框图如图1-3-41所示。

为了便于计算，高阶数字滤波器一般采用下面两种方法来处理。

(4) 高阶数字滤波器的处理方法

1) 将  $W(z)$  的分子、分母作因式分解，都分解成一、二阶的因子，其离散传递函数如下：

$$W(z) = \prod_{i=1}^m \frac{(a_{0i} + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2})}{(1 + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2})}$$

$$= \prod_{i=1}^m W_i(z) \quad (1-3-63)$$

用级联式实现时，其算法框图如图1-3-42所示。

2) 将  $W(z)$  展开成  $m$  个部分分式之和，其离散传递函数如下：

$$W(z) = \sum_{i=1}^m \frac{a_{0i} + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2}}{1 + b_{1i}z^{-1} + b_{2i}z^{-2}} \quad (1-3-64)$$

其算法框图如图1-3-43所示。

级联式数字滤波器的简化框图如图1-3-44所示，并联式数字滤波器的框图如图1-3-45所示。

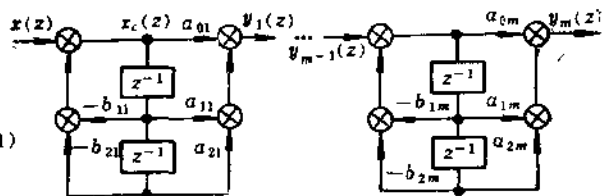


图1-3-42 级联式高阶数字滤波器

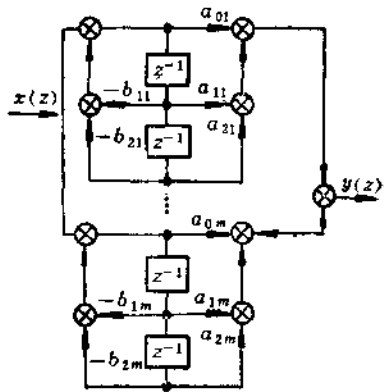


图1-3-43 并联式高阶数字滤波器



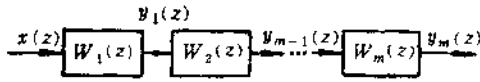


图1-3-44 级联式数字滤波器简化框图

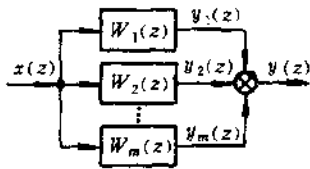


图1-3-45 并联式数字滤波器简化框图

## 第二节 放大器和信号转换技术

### 一、概述

各类型的传感器输出信号需要经过放大器或有关的器件以便进行缓冲、隔离、放大、电平转换、电压-电流转换以及电流-电压转换的处理等技术。这些功能大部分可以用运算放大器完成，但如何设计一个最佳的系统，选用什么样的组件是相当重要的，本节重点讨论仪器用放大器及隔离放大器。

### 二、运算放大器

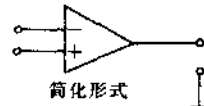
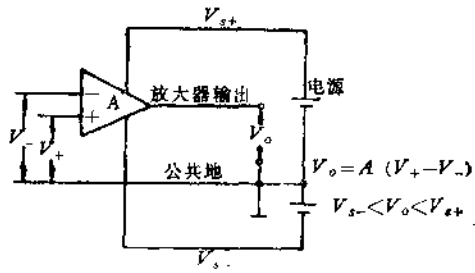
运算放大器主要应用于以高稳定增益的要求为前提的线性放大器中。运算放大器的高增益同深度反馈相结合所形成的放大倍数几乎与温度、时间和运算放大器的增益变化无关。其运算方式取决于外接元件和电路的接法，而不取决于开环增益的大小。

图1-3-46为运算放大器的电路符号和开环特性曲线。其增益  $A$  在理想条件下是无限大的，而实际上也是相当大的(在低频时为  $10^5 \sim 10^6$ )，所以差分输入信号必须接近于零，输出才能在极限值以内，如果放大器是处在理想的状态下(即增益、带宽和输入阻抗是无限大而输出阻抗近似零)就可以得到许多有用的结果。一般在某一特定的条件下，基于理想放大器的前提，是可以找出其实用的放大器。

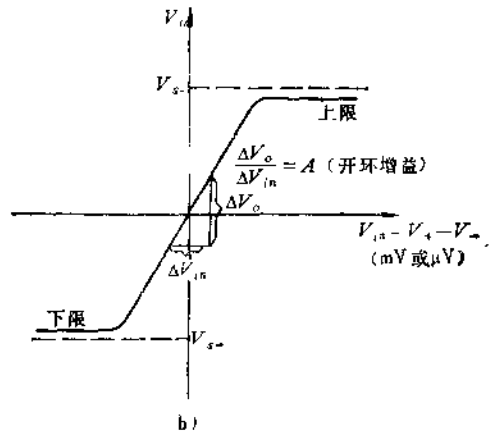
根据实际工程的需要，下面分别介绍几种典型的应用线路。

#### 1. 作为跟随器的运算放大器

如图1-3-47a所示，其输出经过反馈必定使输入电压  $V_+$  和  $V_-$  近似相等，因此运算放大器构成一个很好的单位增益跟随器。如果反馈量减少，就可以得到具有增益的跟随器，如图1-3-47b所示，其



a)



b)

图1-3-46 运算放大器的基本电路及其特性  
a) 开环运算放大器的电路 b) 输入及输出特性曲线

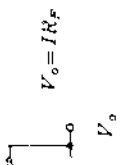
增益由电阻的比值可以很精确地确定。如果有一个测试电阻  $R_M$  从负输入端连到地，为了维持两个输入端，输出端就必须通过非接地的负载  $Z_L$  提供电流，其值等于  $V_{in}/R_M$ ，如图1-3-47c所示。

#### 2. 运算放大器的反相应用

如果正输入端接地，输出电压必须使负输入端维持在零电位(虚地)。在输入电压端串接一个电阻会使  $Z_L$  中流过电流  $V_{in}/R_M$ ，如图1-3-48a所示。

如果  $Z_L$  电阻是  $R_F$ ，即输出电压  $V_o = -\frac{R_F}{R_M}$

$\times V_{in}$ ，它与输入电压反相，其值可能出现  $V_o \ll V_{in}$  或者是  $V_o \gg V_{in}$ ，取决于  $R_F$  与  $R_M$  的比值，如图1-3-48b所示。如果另一个电压  $V_s$  通过一个电阻  $R_s$  加到



应用  
 决定  
 放大  
 $R/R_M$ , 其值  
 求和装  
 立, 而且和  
 放大器, 各  
 或 e) 作为  
 光电倍增管  
 用  $R_p$  来测度

负输入端，那么通过 $Z_L$ 的电流就取决于两个单独电流之和，即 $V_{i_n}/R_M$ 与 $V_s/R_s$ 两电流之和。两个电流是独立的，因为从输入电压看进去输入电阻的相加点是接地（虚地电位），如图1-3-48c所示。由于 $R_F$ 中流过的电流是诸输入电流之和，故输出电压决定于各输入电压加数之和，即表示为 $V_{i_n}(R_F/R_M) + V_s(R_F/R_s) + \dots + V_N(R_F/R_N)$ ，其电路图表示如图1-3-48d所示。一个输入电流源（如光电倍增管）直接接到负输入端（理想的零阻抗负载），其电流也进行相加，然后通过跨导输出为电压，如图1-3-48e所示。

3. 作为同相输入的同相放大器

基本的同相放大器的电路图如图1-3-49所示。

同相放大器与反相放大器不同之处有三点：

1) 输入信号直接加到同相输入端，因而使输

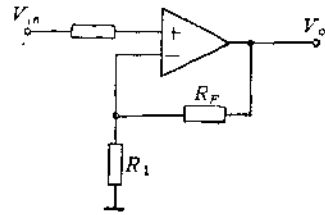


图1-3-49 基本的同相放大器电路

出和输入同相。

2) 电阻 $R_1$ 接地，且不与输入电压相接。

3) 同相放大器闭环增益为

$$A_{vc} = \frac{V_o}{V_{i_n}} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (1-3-65)$$

同相放大器的设计公式见表1-3-19。

表1-3-19 同相放大器的设计公式

序号	说明	公式
1	闭环电压增益（假定运算放大器的参数是理想的）	$A_{vc} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$
2	闭环电压增益（其中 $A_v$ 为有限值）	$A_{vc} = \frac{1 + R_F/R_1}{1 + 1/\beta A_v}$
3	差动输入电阻 $R_{id}$ 和共模输入电阻 $R_{ic}$ 的闭环电压增益（ $A_v$ 为有限值）	$A_{vc} = \frac{1 + R_F/R_1}{1 + 1/\beta A_v + 2R_F/A_v R_{id}}$
4	运算放大器输出电阻 $R_o$ 的闭环电压增益（同时考虑 $A_v$ 为有限值）	$A_{vc} = \frac{1 + R_F/R_1}{1 + 1/\beta A_v + 2R_F/A_v R_{id}}$
5	$A_v$ 、 $R_{id}$ 和 $R_o$ 引起的增益误差为最小时的 $R_F$ 值	$R_F(\text{最佳}) = \left( \frac{R_{id} \cdot R_o R_1}{2R_1} \right)^{\frac{1}{2}}$
6	电路的输入电阻（假如运算放大器参数是理想的）	$R_{in} = \infty$
7	电路的输入电阻（假设 $A_v$ 、 $R_{id}$ 为有限值， $R_o$ 不为零）	$R_{in} = \frac{\beta A_v R_{id}^2 R_1}{(R_1 + R_o)(R_{id} + 2\beta R_1)} \approx \beta A_v R_{id}$
8	电路的输出电阻（假设运算放大器参数是理想的）	$R_{out} = 0$
9	电路的输出电阻（假设运算放大器输出电阻不为零， $A_v$ 为有限值）	$R_{out} = \frac{R_o(R_1 + R_o)(R_{id} + 2\beta R_1)}{\beta A_v R_{id}} \approx \frac{R_o}{\beta A_v}$

(续)

序号	说明	公式
14	由于运算放大器输入失调电流的变化, 而产生的输出直流电压的变化 (设 $R_p = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f}$ 以及 $V_{f0} = 0$ )	$\Delta V_o = \pm \Delta I_{i0} R_f$
15	由于运算放大器等效输入噪声电压产生的输出噪声电压 (以 $V/\sqrt{Hz}$ 为单位)	$V_{on} = V_n \left( 1 + \frac{R_f}{R_1} \right)$
16	由于运算放大器等效输入噪声电压和噪声电流 ( $V/\sqrt{Hz}$ , 与 $A/\sqrt{Hz}$ 或者是 $V^2/Hz$ , $A^2/Hz$ ) 而产生的输出噪声电压	$V_{on} = \left[ V_n^2 \left( 1 + \frac{R_f}{R_1} \right)^2 + I_n^2 R_f^2 \right]^{\frac{1}{2}}$
17	使 $I_o$ 产生的输出电压失调为最小时的最佳 $R_p$ 值	$R_p = I_n \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f}$ 如果此值为负, 就把 $R_p$ 跟同相输入端串联, 并令 $R_p = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f} - R_f$

4. 用运算放大器作正函数和反函数的运算

输出电压是  $V_{in}$  的任意函数, 这决定于输入网络的性质是纯电阻性的、固定的还是动态的、线性的还是非线性的、恒定的还是随时间变化的, 如图1-3-50a所示。图中标的电流  $I$  和电压  $V_o$ 。公式如下:

$$\begin{cases} I = f(V_{in}) \\ V_o = -R_f f(V_{in}) \end{cases} \quad (1-3-66)$$

$$\begin{cases} I = \frac{V_{in}}{R_M} \\ I = -f(V_o) \\ V_o = f^{-1} \left( -\frac{V_{in}}{R_M} \right) \end{cases} \quad (1-3-67)$$

三、测量放大器

1. 概述

在测量和记录中常常要求对小信号进行放大, 如

等)时,要求有一定的输入电平值(如1.5或者10V)。放大器的另一个重要作用是从输入到输出信号的能级转换,如对于接地磁带记录器的匹配就需要将电压值从小能量提高到大能量。

特别是对于非电量电测,已把放大器扩展为匹配装置(信号调节器)。对于组成惠斯顿电桥的电阻应变片,信号解调器除了作为放大器之外,还包括对电桥供电和校准器的校准。

在测量技术中除了少数例外,一般皆采用直流放大器,其频率范围从0 Hz开始。

在测量技术中就要求测量结果的重复性和足够

的可靠性。放大器和其它的一些电子线路(如滤波器)完全被看作一般的辅助手段,它有助于使测量更方便,能排除干扰信号和保护过载。

把测量放大器接在信号源与微处理器之间并非一点问题也没有。如放大器的输入线路必须与信号源匹配好,另外还要考虑所谓的同步抑制,这一节的目的就是介绍选择测量放大器的要点。

## 2. 直接耦合放大器和调制放大器

图1-3-51举例说明了直流耦合放大器和调制放大器的以下四种结构形式:

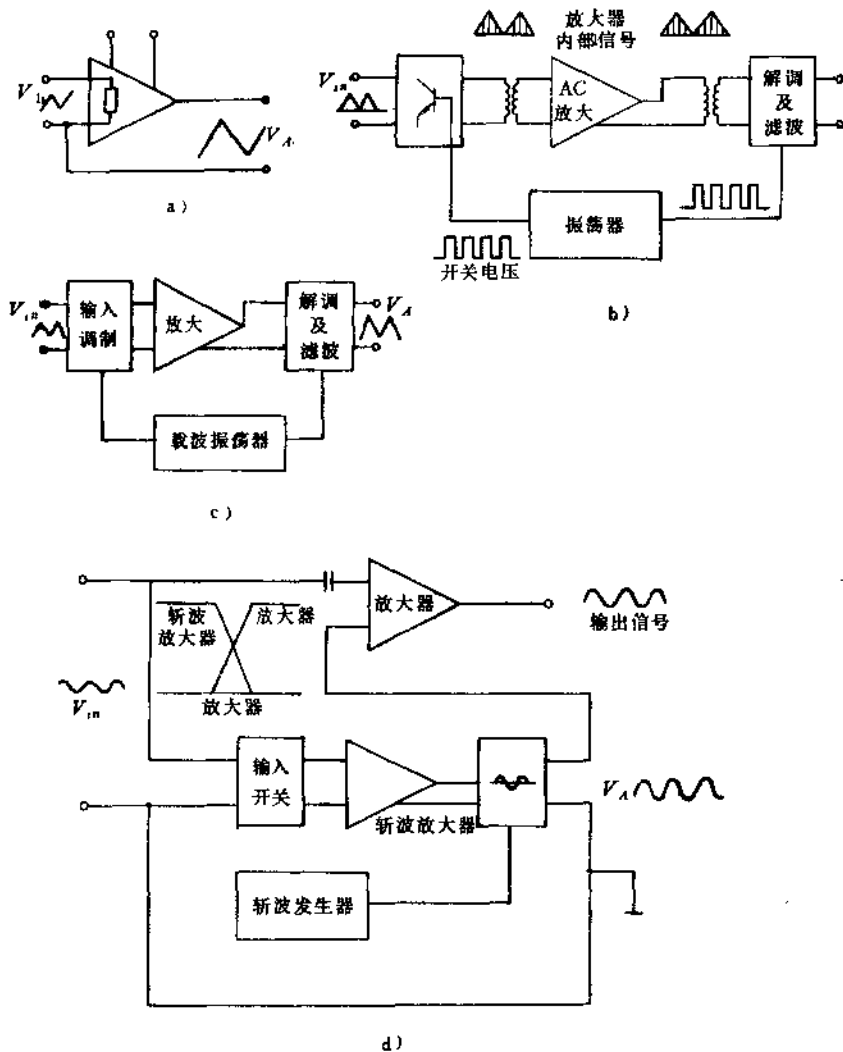


图1-3-51 直接耦合放大器和调制放大器结构形式  
a) 直接耦合直流放大器 b) 斩波放大器 c) 调制放大器 d) 斩波漂移补偿放大器



直接耦合直流放大器；削波放大器（斩波放大器）；削波漂移补偿放大器；调制放大器。

(1) 直接耦合直流放大器 直接耦合放大器的输入和输出之间有电耦合，使得与放大器直接有关的误差，如漂移、噪声和断线等误差也完全被放大。

频响可从 0 Hz 开始，上限频率可达到 100 Hz。在输出端将两个放大器的信号相加，可使之达到所需要的输出电平。

(4) 调制放大器 调制放大器是采用载频调制技术，在输入级利用振荡器提供的载波电压对输入信

目前绝缘放大器电路还在朝着更高的绝缘电压

3. 直接耦合交流放大器电路



导管地基和地面的其它金属部分产生的电化电压决定了与 $\varphi_0 = 0$ 电位的偏差。如果信号源与放大器之间的连接不当，则这些影响因素将导致产生所谓接地回路干扰电压，从而使测量结果不准确。

图1-3-55和图1-3-56所示的信号源与放大器都假定有一个理想的接地零电位。信号源的两个输出

端的电位分别表示为 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ ，则输给放大器的电位差为 $\varphi_2 - \varphi_1$ 。可任意选择两个输出电位与 $\varphi_0$ 的关系，在一般情况下可使 $\varphi_1 = \varphi_0$ ，也就是说，使信号源一端接地。

图1-3-56所示放大器的基本特性及其所受的限制如下。

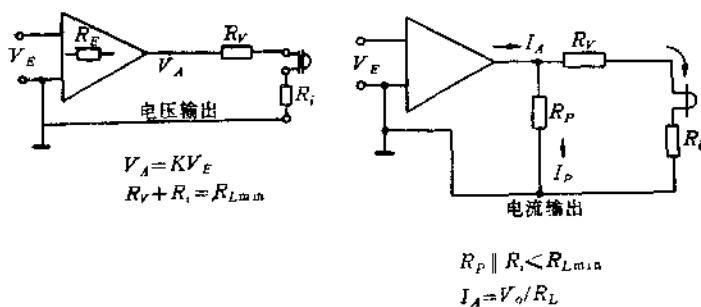


图1-3-55 电压输出和电流输出型放大器输出电路

测量源	非对称接地	非对称绝缘	非对称同相电压发生器	对称接地	对称同相电压	对称绝缘	绝缘仪器	接地仪器	放大器
放大器									应用
非对称接地									
非对称绝缘									
对称接地									
对称绝缘									
非对称绝缘屏蔽									
对称绝缘屏蔽									
绝缘放大器									

图1-3-56 不同类型放大器在测量回路中的应用可能性

不对称的单端接地的没屏蔽的放大器:

结构简单,只适用于接地的信号源,经常是仅作为阻抗匹配用。

不对称的没屏蔽的绝缘放大器:

如果后接仪器是绝缘的,则可进行同相电位测量。小信号同相抑制只能用于小信号同相电压。

对称的接地的没屏蔽的放大器:

能测量较高的同相电位,对后接跟随装置的限制不大。

对称的没屏蔽的绝缘放大器:

特性与前面叙述过的放大器相似。

非对称的有屏蔽的绝缘放大器:

结构简单,成本便宜,灵敏度的范围中等,在较大范围内有高的同相抑制作用。

对称的绝缘屏蔽的放大器:

通用的直接耦合放大器,有极高的灵敏度,对于同相电位有较高的同相抑制作用。

#### 4. 放大器的输出电路

放大器应能使上述后接仪器工作,并应尽可能具有过载保护。

对于后接跟随仪器的连接,重要之点是要知道它要求的是与负载无关的电流还是电压。

图1-3-55为电压输出和电流输出放大器的基本电路。电流输出要求后接跟随仪器(如检流计)的电阻 $R_v$ 低于规定的极大值。而对于电压输出(如负载为显像管时),则要求 $R_v$ 大于规定的最低

广泛应用。干扰的减少程度主要取决于放大器的输入灵敏度和带宽。此外,较困难的是在提高阻抗的同时,将使漂移和噪声相应增大。

(1) 噪声 噪声是一种基本上不可避免的自身干扰电压。任何电阻 $R$ ,由于自由电子的热运动都可以看成噪声源。由于噪声,使得输入电阻 $R_E$ ,带宽 $B$ (此处所说的直流放大器则是截止频率 $f_c$ )和输入灵敏度都受到了限制。要限制输入灵敏度是很明显的,因为有用的信号 $V_E$ 必须大于噪声信号 $V_N$ 。

按照尼奎斯特公式,平均噪声电压的平方值表示为

$$V_N^2 = 4kTRB \quad (1-3-68)$$

式中  $V_N$ ——噪声电压;

$k$ ——波尔兹曼常数,  $k = 1.38 \times 10^{-23}$

$N/K$ ;

$T$ ——绝对温度;

$R$ ——电阻;

$B$ ——带宽。

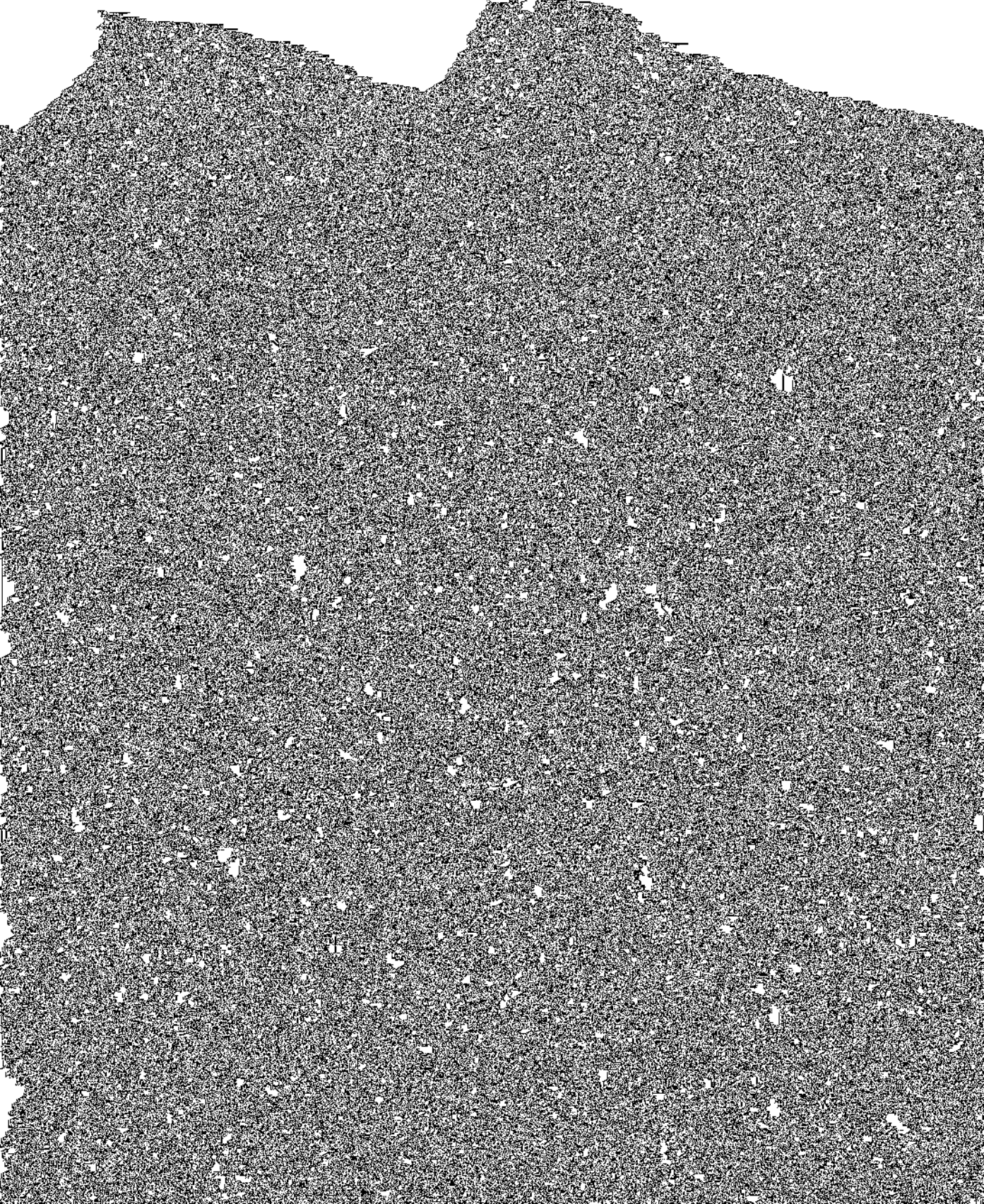
噪声电压随电阻 $R$ 和带宽 $B$ 而提高。在式(1-3-68)中不包括频率 $f$ ,因此在整个频谱范围内噪声保持不变,故用白噪声表示。将 $k$ 值和预定温度 $T = 300K$ 代入式(1-3-68),则得出噪声电压的有效值为

$$V_{eff} = 0.13RB$$

式中,当电阻 $R$ 的单位为 $k\Omega$ ,带宽的单位为 $kHz$ 时,噪声电压 $V_{eff}$ 的单位为 $V$ 。

例:当电阻 $R = 100k\Omega$ ,带宽 $B = 100kHz$ 时,噪声电压 $V_{eff} = 0.13 \times 100 \times 100 = 13V$ 。

有源低通滤波器





一个干扰值。放大器要能抑制这项干扰，所能抑制的程度称为同相抑制或共模抑制(CMR)。

在220V电网线路上分流电阻的电压降为100mV时，要求一个具有共模抑制(CMR)的差分放大器。这时 $\varphi_1 - \varphi_0 = CMV = 220V \times \sqrt{2}$ 和 $\varphi_1 - \varphi_2 = 100mV \approx$ 测量电压。

由电阻应变片组成的惠斯顿电桥所提供的信号也与CMV相叠加。大多数情况下电源电压是接地的，这时 $\varphi_1 - \varphi_0 = CMV = E/2 = 1 \sim 10V$ 和 $\varphi_2 - \varphi_1 = 0.1 \sim 10mV$ 。当不能避免接地回路时，具有高CMR的差分放大器有很明显的优点。原则上信号源和放大器经常都是可以接地的，但是两个接地点并不在同一位置上。这样在信号源的接地电位 $\varphi_{01}$ 与放大器的接地电位 $\varphi_{02}$ 之间就产生了 $CMV = \varphi_{01} - \varphi_{02}$ 。这在现代的测量放大器输入端连接时

因在于放大器的电子部分与接地的放大器外壳之间的耦合电容是主要的影响因素。因此，当同相电压的频率提高后，就有更大的电容电流由放大器的电子部分流向接地外壳。这一电流所产生的电压降，对于同相电压有明显的干扰影响。这些影响对于非对称无屏蔽的绝缘放大器表现最严重，因为这种放大器是同相抑制，受频率影响最大。对于对称的非屏蔽放大器，其影响就小些，因为两端对称接地补偿了一部分。

对于屏蔽放大器，其影响最小。其原因在于这种放大器的有源放大器的电子部分周围有一个密布的静电屏蔽罩。该屏蔽的电位尽可能与电子部分相对于放大器外壳的电位相同。换言之，屏蔽罩与放大器输入端的一个分支相连接。由于电子部分与屏蔽罩的电位相等，因此防止了由电子部分产生的串





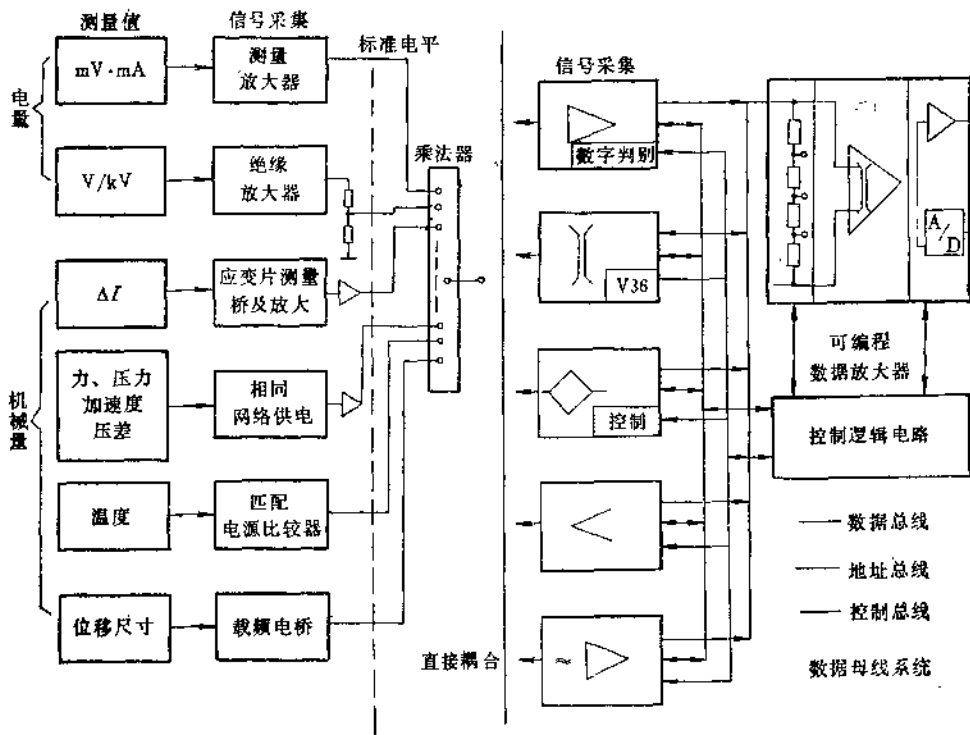
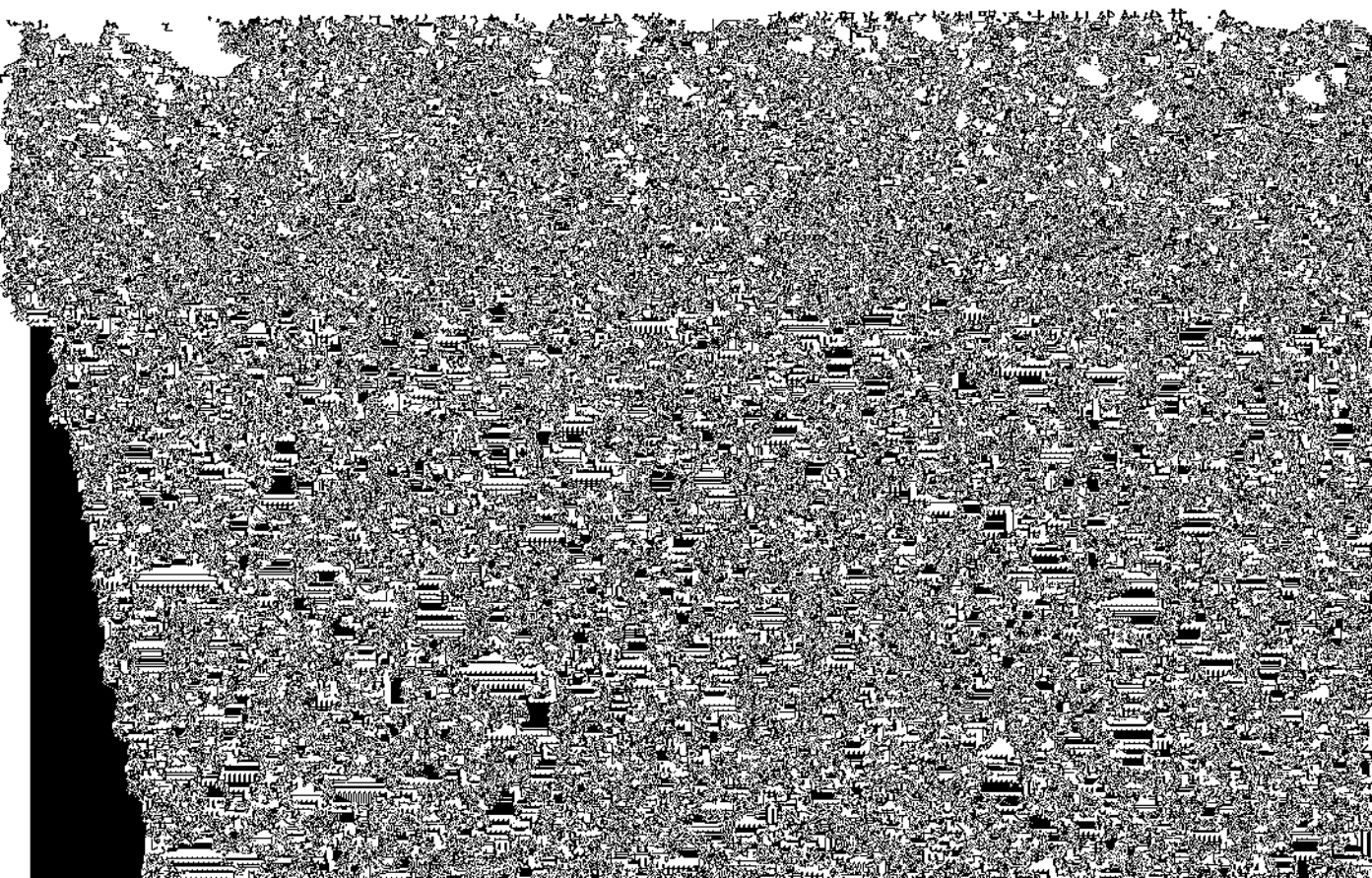


图1-3-62 多路测量装置的信号配直接耦合通道和母线系统

9. 多路放大器系统

本水平。





例如,虽然增益范围规定为1到1000倍,而器件可以工作在更高的增益范围内,但在上述范围之外,则其性能未作规定。实际上,对于一定的器件,由于存在失调,其增益可能高于规定的增益,也可能低于规定的增益。

个失调电压源(其值等于失调电流与信号源内阻相乘)。对于平衡的信号源内阻来说,失调电流或偏流间的差值决定偏流所产生的那部分误差。随着温度,失调电压源产生,产生失调电压源。



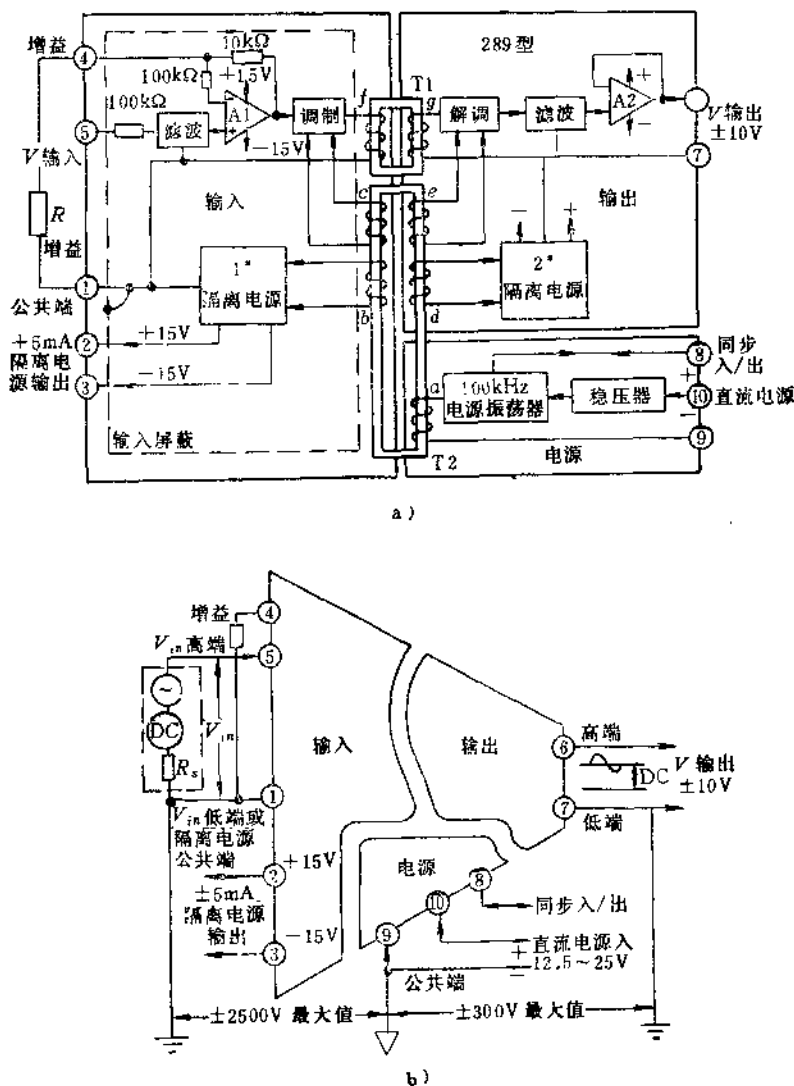


图1-3-63 典型的隔离放大器结构

送出。图1-3-63是三部分（或称三口）隔离器，一部分是电源，另一部分是前端（即输入电路），再一部分是输出电路，这三部分彼此互相隔离。

两线式主直流电源为高频振荡器提供电源，振荡器的输出越过隔离层耦合到输入部分，为前端和外附电路（像前置放大电路）提供电源。输入信号经放大后再调制载波，此调制波越过隔离层耦合到输出部分，在输出部分进行相敏解调（以振荡器为参考）然后滤波输出。

上例中的放大器是用电阻保护运算放大器，实际上保护分两方面，一方面保护放大器免受差分过载；另一方面是当放大器工作不正常时保护灵敏的

输入信号源不致接到电源电压。此放大器可以接成1~100倍的程控增益，其增益值由一个外部的电阻来确定。

因为放大器的两个输入端都是浮离的，所以它能够有效地作为仪器放大器。由于是变压器耦合，此放大器的输出部分和输入部分是隔离的。

浮离电源的输出端在可供输出的电流的范围之内能对传感器、前置放大器和其它的电路提供浮离的电源。在本书的应用部分中，将会找到在传感器的接口电路中应用隔离放大器的各种方法的实例。

图1-3-63所示的典型的289型及类似型号的隔离放大器是一种完全配套的器件。但隔离器还有别



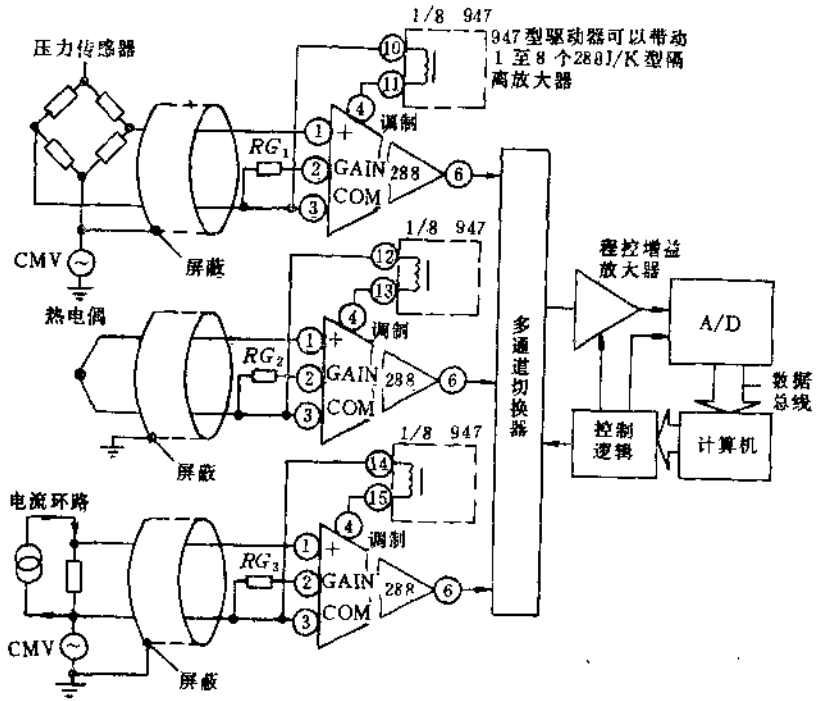
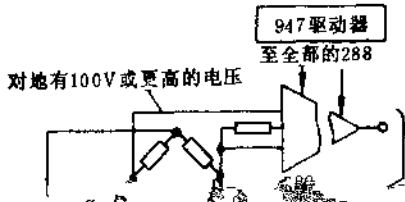


图1-3-65 三通道隔离数据采集系统的前端



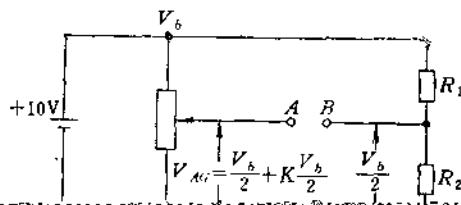
第三，为了避免形成地线环路和过分的噪声，信号的低端B或者传感器电缆屏蔽端S绝不应该多点接地。

第四，连接端子的未屏蔽的导线应尽量短，而且应减小这段导线所包围的面积，使感应的干扰

阻都是相同的)。

自然, 电流源迫使电路产生相当高的共模电压, 特别是这一串上端的传感器, 所以这就需要能承受高共模电压和高共模抑制比的放大器。

因为这样的应用要求多通道高精度的隔离器, 但只需要适当的高共模电压 (低于850V), 所以带有947型驱动器的288型隔离器是很适合于这种使用



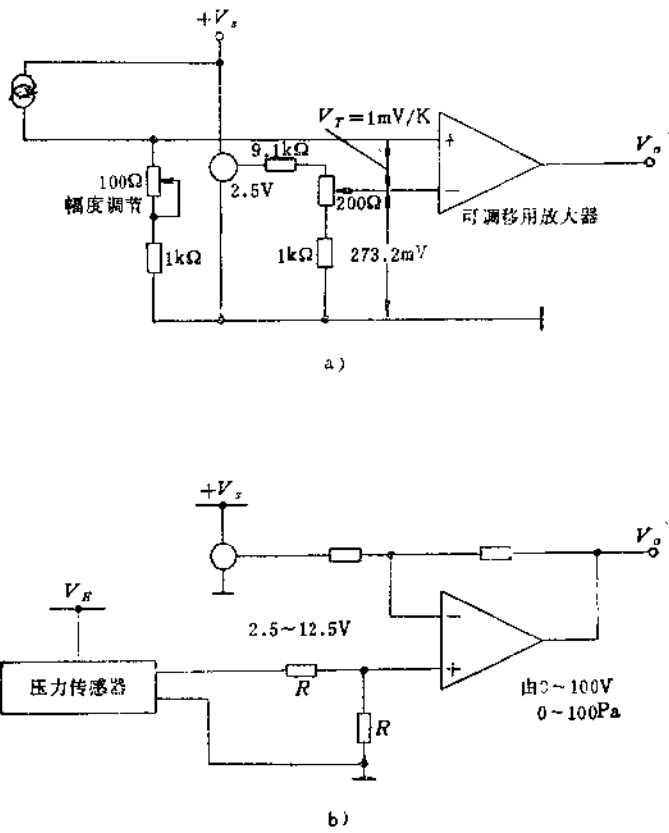
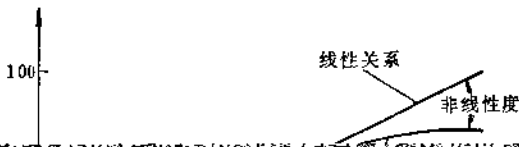


图1-3-68 量程偏置

a) K氏温度传感器加偏置测出摄氏温度 b) 偏置半导体压力传感器的输出



性。有一些具有特殊要求的特性，例如，对数——反对数放大器的对数特性，以及另一些受到元器件特性的限制，但是可以预知其特性，例如，热电偶、电容传感器、非零读数电桥等。再就是元器件





权因子  $W$  是一正数,  $W$  越大, 对应的第  $i$  段的逼近程度就越好。

这样, 最优问题就可以用式(1-3-73)、(1-3-75)表示。实际上式(1-3-73)是自然满足的条件。从图1-3-74可知, 分段得越多,  $V(x)$  与  $K_i(x)$  之间的面积之和就越小。分一段时, 误差面积是  $S_1 = S_{ABCDEF}$ , 而分两段时的面积,  $S_2$  为图示阴影面积, 显然  $S_2 < S_1$ 。如果约束条件(1-3-72)不满足, 假定寻优到第  $j$  次时,  $X^{(j)} = (x_1^{(j)}, \dots, x_{n-1}^{(j)})^T$  从可行域内(满足1-3-72式)到达可行域的边界, 假定  $x_1^{(j)} = x_1^{(i)}$ , 这意味着这时分段的段数比到一次寻优时要少一段, 而根据寻优的原则可知, 第  $j$  次的误差面积之和要比前一次误差之和要小一些, 这显然是矛盾的, 所以, 式(1-3-73)是自然满足的条件。只要初始点  $x^{(0)}$  选在可行域内, 便满足式(1-3-72), 最优问题实际上就是无约束条件下的寻优问题。利用共轭梯度法求解式(1-3-75)解的

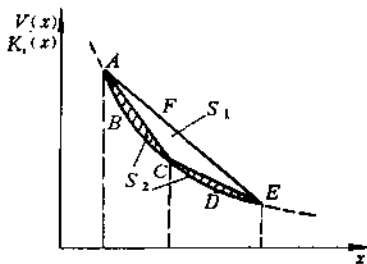


图1-3-74 分段与误差的关系

1. 给定初始值  $x^{(0)}$ 、计算精度  $E$ 、初始步长  $H$ 、权因子  $W_j (j = 1, 2, \dots, m-1, m)$ ;
2. 置  $i = 0, x_1 = x^{(i)}$ ;
3. 计算  $G = \nabla J(x^{(i)})$ ;
4. 若  $i = 0$ , 寻查方向为  $P^{(i)} = -G^{(i)}$ , 否则寻查方向为  $P^{(i)} = -G^{(i)} + \beta^{(i-1)} P^{(i-1)}$ , 其中  $\beta^{(i-1)} = 11G^{(i)} \times 11^2 / 11G^{(i-1)} \times 11^2$ ;
5. 用一维寻查方法求  $t_i^*$ , 使  $J(x^{(i)} + t_i^* P^{(i)})$

