

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知识	40
三、实验室仪器的分类	3	第一节 传感器与实验室仪器	40
第二节 实验室的发展和管理	4	一、传感器的基本类型及其应用范围	40
一、实验室的发展过程	4	二、传感器特性	51
二、实验室在四化建设中的作用	4	三、传感器对使用条件的要求	65
三、人在使用实验室仪器中的作用	5	四、传感器与实验室仪器的接口	65
四、实验室仪器的技术管理	10	五、设计接口的基本问题	65
五、实验室技术队伍的建设	12	第二节 放大器和信号转换技术	78
第二章 对实验室及工作人员的基本要求	13	一、概述	78
第一节 实验设备和物质管理	13	二、运算放大器	78
一、实验设备在实验室中的地位和作用	13	三、测量放大器	81
二、实验设备的管理	13	四、接口电路放大器	91
三、实验物质的管理	14	五、隔离放大器	92
第二节 实验室的环境保护和安全防护	14	第三节 偏置与线性化	96
一、实验室的环境保护	14	一、偏置	96
二、实验室的安全防护	15	二、非线性和线性化的基本概念	96
三、安全操作守则	15	三、典型的非线性校正实例	101
第三节 合理使用仪器与获得精确数据的关系	16	第四章 标准量具	105
一、测量系统的设计原则	16	第一节 标准电池、电压、电流	105
二、测量系统的建立与测试仪器的选择	17	一、标准电池	105
三、测量链的形成与误差分析	24	二、直流标准源	108
四、测量结果的评定与正确使用仪器的关系	26	三、电学量具的基础知识	108
五、测量系统故障的排除方法	31	第二节 标准电阻、电感、电容	109
六、测量和社会、企业的关系	33	一、标准电阻	109
第四节 现代化实验室的建设与对外科技服务	35	二、标准电容	113
一、系统工程方法在实验室中的应用	36	三、标准电感	115
二、电子计算机在实验室管理中的应		第三节 标准长度	117
		一、标准长度的定义	117
		二、长度计量器具的分类	117
		三、标准长度的传递及其维护	118
		第四节 标准质量及物质的量	118

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
 第五节 天平的使用与保养..... 161
 一、天平的使用..... 161
 二、天平的维护与保养..... 162
 第六节 天平的一般故障和简易调修..... 163
 一、机械天平的一般故障和简易调修..... 163
 二、电子天平的一般故障和简易调修..... 168

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、特征温度测量及其标准..... 180
 二、被测物理量的测量..... 181
 三、应用实例..... 182
 第四节 使用与维修..... 184
 一、使用..... 184
 二、维修..... 185

第三篇 分析仪器

第一章 分光光度计..... 187
 第一节 概述..... 187
 第二节 分类及特点..... 187
 一、仪器结构部件的分类及特点..... 187
 二、仪器的分类及其特点..... 189
 第三节 国内外常用分光光度计的型号

和性能..... 190
 第四节 安装与调试..... 195
 一、仪器的安装..... 195
 二、仪器的调试..... 196
 第五节 仪器使用与维护..... 196
 一、日常使用与维护通则..... 196

二、国产分光光度计的使用与维护..... 197

第二章 发射光谱仪..... 200

第一节 概述..... 200

第二节 分类及特点..... 200

一、仪器结构部件的分类及特点..... 200

二、仪器的分类及特点..... 206

第三节 仪器的使用与维护..... 208

一、日常使用与维护通则..... 206

二、7503B型光电直读光谱仪的使用
与维护..... 208

第三章 原子吸收光谱仪..... 210

第一节 概述..... 210

第二节 分类及特点..... 210

一、仪器的结构及特点..... 210

二、仪器的分类及特点..... 215

第三节 仪器的使用与维护..... 217

一、安全使用与常规维护通则..... 217

二、WFX 1E2型原子吸收光谱仪的
使用与维护..... 219

第四章 荧光光度计..... 223

第一节 概述..... 223

一、荧光光度分析法..... 223

二、原子荧光分析法..... 223

三、X射线荧光光谱分析法..... 223

第二节 分类及结构..... 224

一、荧光光度计..... 224

二、原子荧光光度计(原子荧光光谱
仪)..... 224

三、X射线荧光光谱仪..... 226

第三节 仪器使用与维护..... 226

一、实验室的条件与要求..... 227

二、使用须知..... 227

三、仪器的维护..... 227

第五章 气体分析仪器..... 228

第一节 红外碳硫测定仪..... 228

一、用途..... 228

二、工作原理..... 228

三、仪器的结构与作用..... 228

四、仪器的分类及其主要技术指标..... 229

五、仪器的使用与维护..... 229

第二节 热导式氢氧氮测定仪..... 234

一、用途..... 234

二、工作原理..... 234

三、仪器的结构与作用..... 234

四、仪器的分类及主要技术指标..... 235

五、仪器的使用与维护..... 235

第六章 电化学仪器..... 238

第一节 概述..... 238

第二节 分类及特点..... 238

一、电位测定仪..... 238

二、电导测定仪..... 240

三、库仑测定仪..... 241

四、极谱仪..... 242

第三节 仪器的使用与维护..... 244

第七章 其他仪器..... 246

第一节 酸度计..... 246

一、概述..... 246

二、类型及特点..... 246

三、仪器的使用与维护..... 247

第二节 粘度计..... 250

一、概述..... 250

二、类型及特点..... 250

三、仪器的使用与维护..... 251

第四篇 环境试验设备

第一章 环境试验设备概况..... 255

第一节 环境试验技术和发展概况..... 255

一、环境试验技术及其发展..... 255

二、环境试验设备..... 255

三、环境试验室..... 256

四、环境试验设备的选型及使用要求..... 256

第二节 国内外环境试验设备概况..... 258

一、日本的环境试验设备现状..... 258

二、美国的环境试验设备现状..... 259

三、德国的环境试验设备现状..... 259

四、我国的环境试验设备现状..... 259

第二章 干燥设备和温度试验设备..... 260

第一节 干燥设备..... 260

一、电热干燥箱..... 260

二、电热鼓风干燥箱..... 262

三、电热密闭干燥箱..... 263

二、用途.....	330	第三节 XFG-7型高频信号发生器.....	374
第二节 数字电压表.....	330	一、特点和用途.....	374
一、PZ-8型电压反馈逐次渐近比较式数字电压表.....	330	二、主要技术指标.....	374
二、DYJ-2A 斜坡式电压-时间转换型数字电压表.....	337	三、工作原理.....	374
三、DS-18型双积分式数字电压表.....	340	四、使用与维护.....	375
四、数字电压表的选型.....	346	第四节 XFC-6型标准信号发生器.....	377
第三节 PF5型数字万用表.....	346	一、特点和用途.....	377
一、概述.....	346	二、主要技术指标.....	377
二、工作原理.....	347	三、工作原理.....	377
三、技术指标.....	348	四、使用与维护.....	378
四、使用方法.....	349	五、高频和标准信号发生器的选型.....	381
五、复校.....	349	第五节 脉冲信号发生器.....	382
六、数字万用表的选型.....	349	一、XC-2C 型脉冲信号发生器的特点	382
第三章 频率、时间和相位测量仪器.....	355	二、主要技术指标.....	382
第一节 概述.....	355	三、工作原理.....	382
一、根据频率的定义进行测量.....	355	四、使用和维护.....	384
二、用比较法测量.....	355	五、脉冲信号发生器的选型.....	387
三、利用电路的频率响应特性进行测量.....	355	第六节 函数发生器.....	387
第二节 E-312型数字频率计.....	355	一、S101型函数发生器工作原理.....	387
一、工作原理及结构.....	355	二、主要技术指标.....	388
二、主要技术指标.....	358	三、使用说明及注意事项.....	388
三、频率测量范围的扩展.....	359	四、函数发生器的选型.....	388
四、电子计数器测量误差.....	360	第七节 频率合成器.....	390
五、使用和维护.....	361	一、直接频率合成原理.....	390
六、频率测量仪器的选型.....	362	二、间接频率合成原理.....	390
第三节 相位测量仪器.....	365	三、频率合成器的正确使用方法.....	391
一、相位差测量的基本原理和分类.....	365	四、频率合成器的选型.....	392
二、数字相位计的选型.....	367	第八节 噪声发生器.....	392
第四章 信号发生器.....	368	一、噪声信号发生器工作原理.....	392
第一节 概述.....	368	二、伪随机信号发生器.....	393
一、信号发生器的分类和特点.....	368	三、噪声发生器的选型.....	394
二、产生正弦振荡的基本方法.....	368	第五章 电子示波器.....	396
三、常用术语.....	369	第一节 电子示波器导论.....	396
第二节 XD-1型低频信号发生器.....	369	一、示波器的功用.....	396
一、特点和用途.....	369	二、示波器的分类.....	396
二、主要技术指标.....	370	三、电子射线示波管及波形显示和同步原理.....	397
三、工作原理.....	370	第二节 通用示波器.....	399
四、使用与维护.....	372	一、SB-10型普通示波器.....	399
五、低频和超低频信号发生器选型.....	372	二、SBT-5型同步示波器.....	401
		三、SR8型二踪示波器.....	404
		四、SBM-10A型多用示波器.....	407
		五、通用示波器的选型.....	412

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
第四节 常用记录器的使用与维护	478
一、记录器分类与适用范围	478
二、常用记录器的使用与注意事项	478
三、记录器常见故障及其处理	480
第三章 激振设备与环境振动试验	482
第一节 机械式振动台与激振器	482
一、离心式机械振动台与激振器	482
二、机械式振动台主要工作特性	483
三、机械振动台的优缺点	484
第二节 电动式振动台和激振器	484
一、电动式振动台的结构及特点	484
二、主要工作特性	484
三、激振器	488
第三节 电液式振动台	492
一、结构形式及特点	492
二、主要工作特性	492
第四节 振动台的安装和维护保养	494
一、振动台的安装	494
二、振动台的维护保养	494
第五节 环境振动试验	494
一、环境振动试验标准	494
二、环境振动试验方法	495
第四章 振动信号分析仪的选用与 保养	496
第一节 振动分析的主要内容及目的	496
一、振动分析的内容	496
二、振动分析仪的基本组成及功能	496
三、振动分析的工程应用	497
第二节 频谱分析仪性能选用及维护	498
一、常见频谱分析仪	498
二、频谱分析仪的选用	498
三、频谱分析仪维护中的注意事项	501
第三节 结构动态分析仪的选用与保养	502
一、结构动态分析仪的选用	502
二、结构动态分析仪保养中的几个问 题	502
第四节 振动分析仪的工作参数选择与 分析注意事项	503
一、分析前的数据准备	503
二、怎样正确选择振动分析仪的工作 参数	503
三、分析注意事项	505

第五章 应用微处理机分析振动信 号	505
第一节 数据转换器的性能及选用	505
一、数据转换器的特性与分析信号的 关系	506
二、数据转换器的特性与价格的关系	509
三、如何选配微处理机的数据转换器	510
第二节 信号处理技术在振动分析中的 应用	511
一、利用数字计算对振动信号预处理	511
二、利用快速傅里叶变换进行振动信 号的相关分析和谱分析	512
三、利用参数识别方法分析结构固有 特征	512
四、机械设备的故障诊断及特征分析	513
第三节 常用振动分析软件介绍	514
一、数字信号处理程序库	514
二、振动数字信号处理程序库	515
三、模态分析软件包	515
第六章 噪声仪器的选用与维护	516
第一节 噪声测试系统及其选用	516
一、基本测量系统	516
二、便携式测量仪器	516
三、实验室测量系统	517
四、实时分析系统	518
五、传声器、仪器附件的选用	518
第二节 声级计的检验和校正	520
一、灵敏度的检验和校正	520
二、频率响应的检验和校正	520
三、表头线路的检验和校正	520
四、本机噪声的检验与校正	520
五、传声器灵敏度的检验和校正	521
六、滤波器和加权网络的检验和校正	521
第三节 噪声测试系统使用注意事项与 维护	521
一、测量程序	521
二、校准	522
三、背景噪声与反射的影响	522
四、维护保养	523
第四节 噪声评价标准	524
一、常用的噪声评价量与测试量及其 计算	524
二、噪声危害与允许标准	526

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

第一章 扭矩仪	531	二、主要技术参数.....	557
第一节 扭矩测量仪器	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	第三节 直流电力测功器	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
第二节 应变式扭矩仪	536	三、使用与维护.....	562
一、工作原理.....	536	第四节 电涡流测功器	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
第三节 相位扭矩测量仪	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	第五节 电力测功仪	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
第二章 转速仪	545	第四章 油耗仪	569
第一节 概述	545	第一节 油耗测量装置	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
第二节 离心式转速表	546	四、油耗仪的标定.....	569
一、工作原理.....	546	第二节 容积式油耗仪	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
第三节 数字式转速表	548	第三节 数字式油耗自动测量仪	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
第四节 频闪式测速仪	551	第五章 发动机台架试验装置	577
一、频闪测速原理.....	551	第一节 机械效率测量仪	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
第三章 测功器	555	三、使用与维护.....	578
第一节 轴功率测定装置	555	第二节 气电示功器	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	第三节 数字电子示功仪	580
第二节 水力测功器	556	一、结构及工作原理.....	580
一、概述.....	556		

二、使用与维护	587
第四节 综合测试分析仪	582
一、工作原理	582
二、主要性能参数	583
三、使用与维护	583

第五节 工况监测与台架自动测功装置	583
一、台架自动测功装置	583
二、发动机工况监测系统	584
参考文献	586

第八篇 应力、应变仪及智能化仪表

第一章 应变仪	587
第一节 应变仪的工作原理及基本电路	587
一、应变仪的工作原理	587
二、应变仪的分类	588
三、应变仪的基本电路	588
四、应变仪的主要技术指标	593
五、应变仪的使用原则	593
第二节 应变仪故障检查及其处理	596
一、故障检查方法	596
二、静态电阻应变仪常见故障的处理	597
三、动态电阻应变仪常见故障的处理	597
第三节 应变仪的调试、标定与校准	607
一、维修、调试常用仪器仪表	607
二、标定与校准装置	608
三、调试、校验项目	610
四、调试实例	612
第二章 智能化仪表	618
第一节 智能化仪表的功能	618
一、扩大仪器的测量功能,实现多功能多参数测试	618
二、仪器具有校准功能,提高测量精度	618
三、测量过程自动化	618
四、增加诊断功能提高了仪器可靠性	618
五、提高仪表的适应性	619
第二节 智能化仪器系统	619
一、智能化仪器系统的工作原理	619
二、可编程序测试系统	620
第三节 多微处理器数据采集系统	622

一、系统的特点和工作原理	622
二、应用	623
第四节 智能化应变仪测试系统	626
一、应变仪与微机接口	626
二、应变仪与微机接口应用实例	626
三、应变测试的数据采集与处理系统	628
四、数据的采集与处理装置	632
五、智能化仪表的发展趋势	634
第三章 智能化仪器系统的设计与抗干扰问题	635
第一节 智能化仪器系统的设计基础	635
一、设计的内容及步骤	635
二、智能化仪器系统的调试与性能测定	635
三、设计文件的编制	635
四、智能化仪器总体设计的构思	635
第二节 微机的组成与系统的分类	636
一、组成方式	636
二、微机系统的分类	637
第三节 智能化仪器系统的抗干扰问题	638
一、干扰的来源和传播途径	638
二、抗干扰的措施	638
第四节 智能应变仪	640
一、3530数据收集器	640
二、可编程数据收集器	641
三、YT-20静态应变测量处理装置	643
四、DPU-100自动多点数字应变仪	647
五、YJ型及YD型应变仪智能化原理与应用	647
参考文献	651

第九篇 铸造测试仪器

第一章 造型材料测试仪器	653
第一节 造型原材料测试仪器	653
一、概述	653
二、含水量测试仪器	653

三、含泥量测试仪器	656
四、原砂颗粒组成测试仪器	659
五、其他原材料测试仪器	661
第二节 型(芯)砂常温性能测试仪器	666

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
一、试验机一般技术要求.....	786	一、疲劳试验机的用途和类型.....	796
二、试验机的示值检定.....	786	二、PQ-1-6型纯弯曲疲劳试验机	796
三、试验机示值误差分析.....	787	三、PLG-10型高频疲劳试验机.....	797
四、试验机一般故障及其排除方法.....	788	第四章 硬度试验机	799
五、试验机维护保养.....	788	第一节 硬度计量的基本概念.....	799
第二章 冲击试验机	789	一、硬度的概念.....	799
第一节 冲击试验机概述和类型.....	789	二、硬度试验方法.....	799
一、冲击试验机概述.....	789	三、硬度量值传递系统.....	799
二、冲击试验机的类型.....	789	四、硬度试验机的安装、使用、维护	
第二节 JB-30型摆式冲击试验机	790	和检定.....	799
一、主要技术参数.....	790	第二节 硬度试验机常见故障及排除方	
二、结构.....	790	法.....	800
三、使用程序.....	791	第五章 活塞式压力计	802
四、使用注意事项及一般故障排除.....	791	第一节 活塞式压力计基本原理与参数.....	802
第三节 JB3-36型三用冲击试验机.....	791	一、基本原理与结构.....	802
一、主要技术参数.....	791	二、主要技术参数.....	802
二、结构.....	792	第二节 活塞式压力计的检定及维护.....	802
三、使用程序.....	792	一、检定.....	802
四、一般常见故障及排除方法.....	792	二、维护与保养.....	804
第四节 摆锤式冲击试验机的检定.....	792	参考文献	805

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

一、实验室仪器的发展趋势

实验室仪器仪表是当今世界正在迅速发展的新兴行业，它是检测产品性能和质量必备的工具，广泛地应用于国民经济的各个领域。

实验室仪器仪表是开展工农业生产、开发和节约能源、提高经济效益的技术工具之一，在四化建设和新技术革命中起着非常重要的作用。它具有技术高度密集、综合多种技术、对新技术特别敏感和产品更新换代快等特点。因此，科技进步对仪器仪表工业有着十分重要的影响，而发展仪器仪表又是促进科学进步的重要技术对策之一。

新技术革命的特征主要有：信息技术、微电子技术、材料科学、能源技术、海洋学、生物科学、航天技术和核技术等，是以群体的形式出现的。在新技术革命中，仪器仪表既是实现测量与控制的技术工具，又是发展计算技术和通信技术不可缺少的手段。因此，仪器仪表是信息技术的基础。与此同时，新技术革命中所产生的新技术群，又为仪器仪表的发展和仪器仪表的技术改造提供了有利的条件。近几年来，世界各发达国家仪器仪表工业在生产结构、技术结构、产品结构和系统结构等方面发生了巨大的变化。

目前我国仪器仪表工业在科学技术方面与国外的差距主要表现在以下几方面。

1. 智能化方面

工业发达国家已广泛采用微电子技术和计算技术，向智能化和自动化方面发展，使仪器仪表功能扩大、精度提高、体积缩小、稳定可靠。80年代初期美国和日本智能化仪表已发展到占整个仪器仪表总数的50%以上，而我国只占百分之几。

2. 传感器和检测仪表开发方面

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、射线、核磁共振和超声成像等技术。有的已将微处理器装入传感器，实现数字化和智能化，从而提高了检测仪表和传感器的精度和可靠性，扩大了仪器仪表的功能和应用范围。

3. 标准化方面

工业发达国家的产品质量好、标准化水平高，从产品质量控制到全面质量管理构成了仪器仪表产品质量的保证体系。由于普遍开展模块化、组合化和标准化设计，对于建立用户信誉、组织专业化生产、缩短新产品开发周期和降低成本取得了明显的效果，我国目前还没有形成完整的标准化体系。

4. 机电仪一体化方面

工业发达国家普遍采用机械与电子技术，发展机电仪一体化产品，系统成套水平高，受到用户欢迎。典型的机电仪一体化的产品有工业机器人、数控机床、智能化仪表、自动化装配线和包装机械、电子控制汽车和电子化医疗器械等。此外，大型发电机组、高速连轧机、大型连铸机等现代化装备的主机，电气传动和仪表控制系统成套发展，实现前馈、超驰、协调控制，最优控制、多级控制等特殊功能和高级自动化功能，经济效益明显提高。

5. 新工艺、新材料利用方面

工业发达国家非常重视对新工艺、新材料和新元件的利用与开发。近几年来大量采用光纤纤维、激光、生物技术和光电子等新技术。在计算机辅助设计、精密工程塑料件铸造、表面防护、精密加工和自动测试技术等方面的水平也达到了新的高度。

根据上述分析，我国仪器仪表与国外相比尚存在较大差距。要提高仪器仪表的水平，必须发展微电子技术。工业发达国家80年代初期仪器仪表先进水平的标志之一就是广泛应用了微电子技术，向机

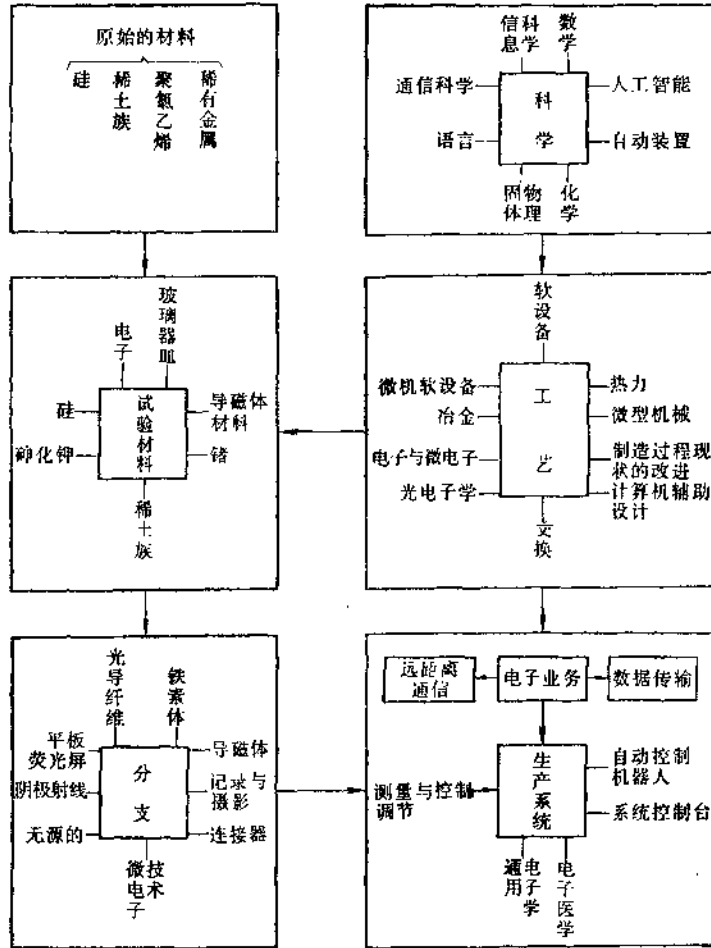


图1-1-1 微电子技术领域概况图

电仪一体化发展。

发展微电子技术和许多基础工业有关,图1-1-1说明微电子技术的基础工业领域内的应用概况。

原始材料和试验材料组成材料科学的基础,而材料科学则是提高仪器仪表水平的一个重要环节。由于信息、通信、人工智能、自动装置、化学、固体物理、数学、语言等科学的发展,对各种工艺学科提出了新要求。因此,工艺学科的发展是提高仪器仪表水平的另一重要环节。例如,软设备工艺、微型软设备、冶金学、电子与微电子学、光电子学、热力学、微型机械、制造过程现状的改进、计算机辅助设计以及交叉等学科的发展,除了对远距离通信系统、数据传输系统、通用电子学系统、测量与控制调节系统、电子医学系统、自动控制机器人系统等学科的发展,提供了雄厚的技术基础,同时

还对材料学科的发展提出了新的要求。新型的材料学科在各种复杂的工艺发展基础上,又逐渐产生了一系列门类齐全的分支,例如,铁素体、导磁体、记录与摄影、光导纤维、平板荧光屏、阴极射线管、无源器件、连接器、微电子技术等。这些分支的发展又促进了生产系统的发展。

这样一整套的相互制约的发展程序,使得仪器仪表行业迅速发展并形成体系。目前仪器仪表产品发展的特点和趋势主要有以下几个方面。

1. 仪器仪表产品结构正在加速电子化。
2. 仪器仪表的显示和控制系统的构成正在加速数字化。
3. 仪器仪表本身的操作正在迅速实行自动化。
4. 仪器仪表整机具备的能力正在实现多功能化。

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

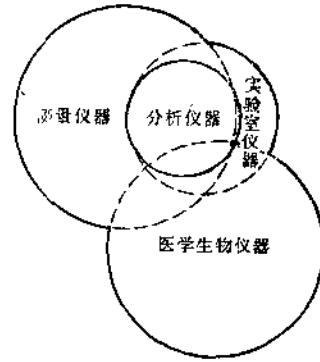


图1-1-2 各类仪器的定义范围

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(反应堆)、坩埚(熔炉)、玻璃器具、电子回转加速器、分析天平
4. 试验装置
5. 各式各样的仪器

根据我国仪器仪表行业的发展规划以及生产厂的概况, 我们将实验室仪器分成九大类, 而将这九类中没有涉及的一些其他仪表归于第十类, 亦做了一些简要介绍。由于篇幅限制, 此手册仅重点介绍一些典型的仪器的使用和维护。

第二节 实验室的发展和管理

一、实验室的发展过程

实验室仪器的发展与我国实验室的建设密切相关, 回顾一下我国实验室建设发展的过程, 大致可分为以下四个阶段。

1. 50年代期间

这段期间实验室的建设规模小、数量少、分布散, 实验条件相当落后。体制上照搬原苏联的模式, 所使用的实验室仪器大都是原苏联淘汰的仪器设备。

2. 50年代末到60年代中期

这一阶段实验室的建设得到了较大的发展。随着国民经济的迅速发展, 这一段时期的实验室配备了一部分先进的仪器设备, 建立了各种规章制度, 形成了一支初具规模的实验技术队伍, 但实验室体制没有改变。

3. 60年代初期到70年代中期

这一段时期内由于对实验室存在偏见, 其建设受到了不同程度的破坏而处于倒退阶段, 实验室仪器的发展也处于停顿状态。

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方式已不再适应。如何合理布局和建设实验室, 如何提高实验室和仪器设备的投资效益, 如何建立一支结构合理、稳定的实验室技术队伍等等, 是一个综合性的工作, 远不是传统的管理方法所能解决的, 它迫使人们站在新的高度上, 根据系统工程的观点, 建立一种实验室科学管理理论, 以指导实验活动。本节将对实验室的作用、人在使用实验室仪器中的作用、实验室技术队伍的建设以及科学管理加以论述。

二、实验室在四化建设中的作用

实验室仪器是武装实验室的一个重要组成部分, 而实验室又是开展科学研究的重要基地。可以说实验室的工作水平, 是反映科学技术水平和管理水平的重要标志, 同时也体现了为国家四化建设服务的实际能力。为此, 各级领导部门都应当充分认识实验室工作的地位和作用, 加强对实验室工作的领导和管理。下面分析实验室的具体作用。

1. 在出成果出人才中的作用

科学实验是人类认识和改造世界活动中的三大革命运动之一。它既是检验科学真理的唯一标准, 又是总结和开创科学理论的主要依据。国际上许多著名的实验室都是出成果出人才的重要基地。以英国剑桥大学的卡文迪西实验室为例, 在它建立的100多年中, 人才辈出, 先后有17位诺贝尔奖金获得者。在这个实验室里, 马克斯威尔创立了电磁波理论, 汤姆逊发现了电子, 卢瑟福击破了原子核, 布拉格开创了生物分子结构的研究, 英特则是全世界研究固体物理的先驱。美国的贝尔实验室、劳伦兹实验室以及在法、俄、德、日等国家的实验室, 这类的例子枚不胜举。因此, 从这个意义上讲, 没有

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。

现代科学技术是以实验室为基础的。我国著名的科学家张文裕教授说：“科学实验是科学理论的源泉，是自然科学的根本，是工程技术的基础。”著名的物理学家丁肇中在获得诺贝尔奖金时曾说过：“自然科学理论离不开实验的基础，特别是物理学是从实验产生的。”由此可见，实验室是开发智力资源、孕育发明创造、丰富人才精神及物质生活的现代化源泉。众所周知，像电话、电报、飞机、激光技术、光导纤维技术、电子技术、基本粒子的发现以及电子计算机的出现与应用……，所有这些在科学技术发展史上起着重要作用的新材料、新工具、新技术、新工艺、新理论的出现，大都来自实验室。

实验室在科学技术发展中具有巨大的作用，主要是因为实验室有条件模拟各种自然现象，为人们重现实验提供条件；它还能提供不可取代的条件，像医疗中的动物实验，成千上万次地实验为医学科学奠定了基础。从这一观点出发，科学研究离不开实验室这一重要场所。

随着科学技术的发展，实验室正在逐步地改善，实验室仪器不断地更新换代，测试技术不断提高，科研成果转化为生产力的周期不断缩短。大量事实证明，实验室是科学技术转化为生产力的必不可少的环节。

2. 在国民经济建设中的作用

一些科学技术发达的国家对各类实验室的建设与管理十分重视。近几年来，英、美、德、苏、日等国都有实验室组织与管理、测试技术等专门的书刊和杂志。我国也相当重视实验室仪器的发展与规划，组织了全国各高等院校、研究院所以及实验室仪器生产厂家参加的实验室仪器学会，建立了全国实验室仪器情报网，组织编辑、出版《实验室仪器》行业刊物，这些工作对促进企业工作的开展，对科研、生产都起到了重要的作用。

目前我国实验室仪器行业的总任务是到2000年实现翻两番。我国国民经济实现2000年翻两番的战略目标要靠科学技术的进步。因此仪器仪表不仅仅是科学技术的基础，而且是催化剂，在现代化生产中发挥着至关重要的作用。现代社会是高度信息的社会，而高度信息社会是离不开仪器仪表的。下面

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。

湖南省衡阳县农业技术推广站于1983年开展了63个实验项目，2000多个实验区，收集了十多万多个实验数据，通过对品种对比、土壤改良、科学施肥、微量元素分析、研究和推广等，使全县农业获得大丰收，增加3亿多斤粮食。

北京农业技术推广中心利用仪器仪表测定土壤含锌量，并控制含锌量在1.0~1.5ppm左右，使西红柿产量增长一成。在新种培育方面，他们增大水稻的含铁成分使大米成为红色、黑色，在国际市场上很受欢迎，达到每斤12元。

农业气象部门利用气象仪器提高长、中、短预报的准确性，配合农业科学实验，对西瓜、花生、棉花等作物取得了较好的经济效益，充分地发挥了气象仪器在国民经济中的作用。

总之，实验室仪器在国民经济建设中的作用是巨大的，有许多工作等待我们去开发。为彻底改变实验室行业的落后状态，在“八五”期间我们还将进行以下工作：大型成套设备、重点产品、基础元件器件、基础技术、新技术推广、重大标准项目、采用国际标准项目、引进技术、引进技术消化吸收项目、研究机构及事业的发展、科研测试基地的建设等。上述项目实现后，我国实验室行业将出现一派崭新的面貌。产品水平将有极大的提高，主要产品的技术水平将达到国际90年代初的水平。并可成套提供实验室技术装备。全行业一定能实现产值、利润翻两番的目标。所以说实验室仪器的发展与四化建设密切相关，是四化建设中的不可缺少的重要组成部分。

三、人在使用实验室仪器中的作用

(一) 实验设备的地位和重要性

对科学研究而言，科学仪器和实验手段是先决条件。一个科研课题是否可行，首先决定于提供科学仪器和技术装备的可能性。因而在可行性的方案论证中，必须注意器材方案的论证、科学仪器和技术装备的论证，否则将因实验条件的不足而导致科研工作无法进行下去。所以说科学仪器和技术装备的水平，是科学发展水平的重要标志。

例如，有了核反应堆才能对原子核进行深入的研究，有了加速器才能对基本粒子的运动规律进行研究。总之，科学研究离不开科学仪器、技术装备和实验材料。离开这些，将寸步难行。

(二)人在测量系统中的作用

人在测量中的作用很大,这是人所共知的。但是对于人的这种作用,并不象测量仪器和测量设备那样,被列为工程学的内容或被列为科学领域的一个学科而认真对待。然而,只有正确地对待自动化同人的关系,对待正确测量和正确评定测量结果与人的关系,才能逐步地使人与测量系统、社会相结合,才能使人们对测量问题与过去有不同的认识,才能使人们在设计系统时充分地估计到人的作用因素。

另外,对从事实验室工作的技术人员本身也应有一定的要求。如必须具备对所从事的测试对象、所选用的测试方法、仪器设备、信号处理技术和对测试结果的分析等,有一定广度和深度的了解。还应当具有一定的组织管理才能和操作技能。只有在这一技术领域里具有一定的广度和深度的知识,才能更加深入地调查和研究问题。同时,还必须树立从实用观点出发的思想,以免陷入只见树木不见森林的泥坑。

下面我们从实验的系统设计、测量结果的评价和测试系统的可靠性三方面来说明人在使用实验室仪器的过程中的作用。

1.系统设计

一个测量系统的设计,首先就是按照被测对象的技术要求或目的,运用实验室仪器设备、环境条件等,来确定适当的测试系统,使之符合人们的要求。

一般来说,对于设计一个测量系统,如选用什么样的传感器、信息采集器、信息传输方式、信息处理器等各类仪表,以及仪表之间如何连接、匹配,使之能满足测量的目的要求。诸如此类的种种因素是相当复杂的,在很大程度上取决于设计者的思路、经验、知识面与创新精神。就一个优秀的实验室工作人员来讲,应该完成以下工作:

(1)测量系统方案的选择 为满足测量目的的要求,选择几种可能方案进行分析比较并从中选择出最佳的方案。这一阶段包含着大量的分析工作,首先要使选用的测量系统形成粗略的轮廓,然后进行比较性评价,最后确定测量系统的方案。

(2)实现可能性的研究 要对测量系统方案实现的可能性进行详细的研究、分析。如果被选择的方案在实现上缺乏许多必要的条件,而这些必要的条件是无法创造的(如特殊的器材、仪表、材料

等),或者所选择方案受到了人力、经费、时间的限制,就必须重新考虑。

(3)测量误差的分配 对构成整个测量系统的各个单元提出技术指标的要求,即把总的测量系统指标分配到各个子系统以至于各个元件上去。要充分地利用系统的分析成果,也就是一个优秀的实验室工作者必须熟知每一个元件、部件如何影响子系统的性能,而子系统的性能又如何影响着整个系统的性能。

(4)测量系统的组成及典型故障分析 根据上述原则组成测量系统,对被测对象进行测定并能分析判断测试结果的正确与否,对一个优秀的实验室工作人员必须能正确地判断所得数据是否正确,并能够合理地排除典型的故障,使实验顺利进行,得出最佳的测试结果。

对于一个优秀的系统设计,设计时首先要将所希望的系统“模式化”,也就是对测试系统要有明确的技术要求,这个技术要求又服务于那些使用上的目的。其次是设计者应充分分析研究影响测量系统的各种相关因素、变量以及它们之间的变动范围,图1-1-3说明了测试系统的设计程序。

在设计新的检测系统时,设计者首先要提出与新系统相关的、有待于解决的一系列条件和前提,如仪器、设备、器材、人员等。若已存在类似的系统,则可以把两种系统加以比较,找出差别和各自的优缺点,作为新系统设计的依据。根据差别研究代替新的测试系统的方案、任务及技术关键。并要根据客观存在的约束和标准规范评价代替方案的优缺点,以便确定适当的设计。经过研究、分析,而后执行设计,经过最后检查结果再反馈至初始的系统模式,这样就完成了一个整体的系统设计。

人们进行系统设计时,总是按照下述三种方式规划自己的行动。

计划→实行→检验;

总体→局部→汇总;

分析→综合→评价。

进行系统设计的原则思路也大致如此。如何更有效地将人的思路与计算机结合起来,互相补充以达到最优设计,这是近些年发展的计算机辅助设计,这种设计扩大了人的设计能力。计算机与人的结合形成“人-机”复合系统。一般的系统都是“人-机”复合系统,所以在系统设计时要及早地考虑人的因素。例如,在明确了所测试的具体目标之

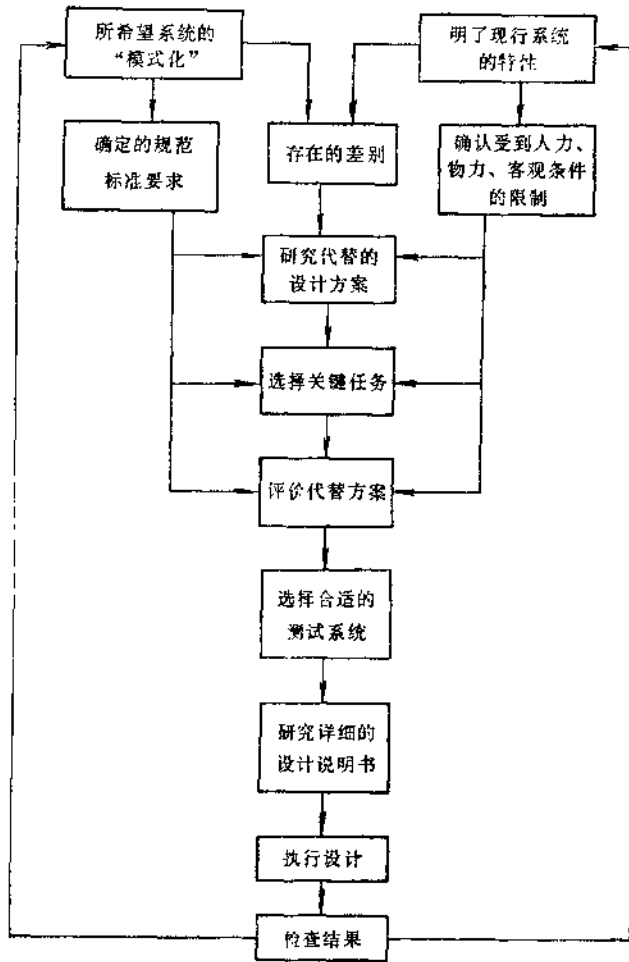


图1-1-3 测试系统设计程序

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。防止由于测量仪器的使用情况或测量方法不同,而对同一测量对象产生不同的测量结果。除此之外,还应当特别重视测量结果的评定方法,不统一的评定方法使测量结果无法应用或推广。

为了使读者弄清楚在系统研制的各阶段中,各种专家的作用和必要条件,见表1-1-1的说明。为合理地制定人和机器的功能分配,应当充分地了解和机器的各种特征、优缺点和所受的限制,表1-1-2详细列出了人和机器的各种特征。根据其特征,便可以制定功能分配的原则。当然,随着系统的不同,

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,还应注意到的功能在今后不会有大幅度的提高,而机器功能则会有大幅度的提高。因此,要有一定的灵活性,还应当考虑到人和机械之间的通信。

2. 系统的评价

对于一个测量系统的评价,首先是对测试系统的鉴定。该设计系统是否达到了原设计要求,能否投入使用,是否需改进等。

系统的评价方法主要有矩阵法、成本/效果分析法、多目的系统的评价法及技术再评价等。根据测试系统的实际需要,我们仅介绍较为常用的前两

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	必要的数据库种类
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 序号	机 器	人	名称 序号	机 器	人
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心都可以检测	只有认识和直接感觉的能力, 但没有一定的标准值, 而且在一定范围内变动, 并具有味觉、嗅觉和触觉	6. 效率	若具有复杂功能时, 往往重量增加, 而且必须有大的功耗, 可以只为满足必要的功能而设计, 作业无浪费, 若作业单纯, 则速度快且准确; 对于新的机器, 其设计、制造直到运转都要时间, 万一情况下, 损坏也不要紧, 因此可在危险条件下使用	需要吃饭等 一个人作为一个单元具备生理机能, 因此可以适应各种复杂条件; 必须教育与训练; 必须采取各种措施保证安全
2. 操作	在速度、精度、力、能量以及操作范围、耐久性等方面远超过人, 处理液体、气体、粉体的能力也远超过人, 但处理柔软物体的能力不及人	具有非常多的自由度, 而且在各种自由度上可以微妙地进行三维的各种运动, 可以实现视觉、位移、重量、感觉等综合的高级反馈控制, 高级运动	7. 通讯	只以很有限的手段进行与人之间的通信	与他人通信容易, 人事关系的处理很重要
3. 信息处理功能	可得两最初程序高度正确地重复进行数据处理, 记忆不会遗忘; 记忆信息量大时, 检索速度快	特征的抽象、归纳能力, 图形判别联想能力, 发明创造等高级思维能力, 大量丰富地记忆着高级经验	8. 灵活性和适应能力	专用设备不能够改变用途, 容易进行合理化的整理	经教育和训练后, 具有多方面适应性
4. 耐久性和维护性 持续性	依赖于成本, 必须适当维护, 容易承受连续、单调的复杂作业	必须适当地休息、休养、治疗等, 难以忍受长时间的紧张刺激, 承受无意义的单调作业能力较差	9. 经济性	需要购入费和运转保养费, 万一机械不能使用时, 损失的只是机械价值	除了工资之外, 还要给予福利、卫生和家庭照顾; 在万一情况下, 会丧失生命, 损失巨大
5. 可靠性	对于满足一定成本并设计适当的机器, 按着预定指标进行作业, 可靠性较好, 但对预定之外的事情则完全无能力 特性保持一定, 几乎无变化	在突然的紧急条件下, 完全不可靠的可能性很大 工作状态随着兴趣、责任感、肉体的及精神的、健康状况、意识级别等心理和生理条件而变化容易产生错误 每个人的特性和经验不同, 对他人有影响			

种。其他方法只作简要说明, 详细分析见有关参考文献。

(1) 矩阵法评价 这是一种可以分析出各因素间的相互关联的方法, 可以分为考虑时间变量和不考虑时间变量的方法。前者又分为关联矩阵法和正交辅助矩阵法。其系统评价框图如图1-1-4所示。

常用的数字表达式为

关联矩阵法:

表1-1-3 功能分配的一般原则

采用机械时的有利点	用人时的有利点
1. 重复性的操作、计算及大量信息资料的存储	1. 由于各种干扰, 需要判断信息时
2. 大量的数据处理	2. 在图形变化下, 需要判断该图形时
3. 根据某一特定规范, 多次重复地给出判断	3. 要求判断各种各样的输入时
4. 由于环境上的约束, 对人有危险或操作容易犯错误时	4. 对发生变化的频率非常低的情况下, 需要判别时
5. 当调节、操作速度非常重要, 具有决定意义时	5. 解决问题需要归纳、判断力时
6. 控制力的施加要求非常严格时	6. 预测不测事件的发生
7. 必须长时间施加控制力时	

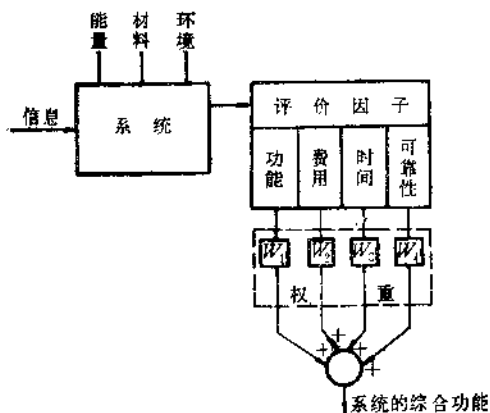


图1-1-4 系统评价框图

$$W_i = \sum_j a_{ij} W_j \quad (1-1-1)$$

式中 W_j ——评价时各因子的相对重要程度;
 a_{ij} ——各评价项的评价因子的评价价值;
 W_i ——总评价价值。

正交辅助矩阵法:

$$W_{iN} = \left(W_i / \sum_i W_i \right) \times 100$$

$$= \left(\sum_j W_j a_{ij} / \sum_i \sum_j W_j a_{ij} \right) \times 100 \quad (1-1-2)$$

式中 W_{iN} ——正交辅助矩阵法表示符号;
 i, j ——评价项目。

考虑时间变量的方法又分正交影响矩阵法及修正的正交影响矩阵法。这是一种从各种技术间相互关联性出发预测技术的开发, 并对总体进行推测评价的一种方法。当预测一个项目的发生概率时, 要同时判断与其他预测项目间的相互作用, 并参照这种判断对即将预测项目的发生概率进行修正。

(2) 成本/效果分析法 这是一种基于系统的效果、成本的分析结果进行评价的方法, 其基本结构如图1-1-5所示。图1-1-6表示系统评价的流程模型。

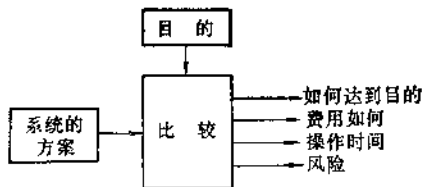


图1-1-5 基本结构图

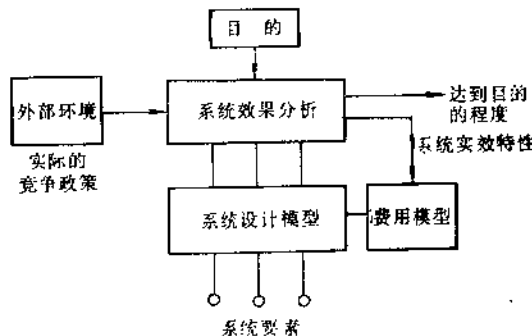


图1-1-6 系统评价的流程模型

重要的是要考虑目的尺度及环境影响的定量化, 以确定系统特性和环境特性的定量评价标准。在分析过程中应进行的基本询问项目有如下几点:

系统的目的如何(确定定量尺度是很重要的)? 何时能够使用所提方案的系统(延迟完成会影响效果, 而缩短期限又会大大增加开发费用)? 系统的开发、运用费用如何? 达到系统目的的最佳策略如何? 达到预定系统及预计费用的风险如何?

例如, 要组织一个测试系统, 除需要仪器设备外, 还应考虑外部环境对系统的影响以及达到最后目的需要的费用和必要的资源。

(3) 多目的系统评价 测试系统目的比较明确, 一般选择方案的原则是使评价指数最大。

(4) 技术再评价。

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。

(2)故障对策 对于分析出的测试系统的故障,应该制定防止、预防的对策,以使故障不会发生。

(3)复原处理 即使采取了故障防止和预防对策,但是还必须以必然发生故障为前提进行测试系统的设计,研究当系统发生故障时如何使其恢复的方法。

由于仪器仪表在测试系统的工作中会受到各种外界影响,难免产生故障。首先是环境力的作用。所谓仪器仪表的环境力,即是仪器仪表工作环境中的各种物理、化学、生物量作用于仪器仪表的作用力。按照国家标准规定,将环境参数分为气候、生物和化学、机械、电与电磁四大类。测试系统由于环境应力所产生的影响大致可分为两大类,首先是机械的影响,表现为部件的损坏或失效;其次是功能影响,表现为系统性能发生有害的变化。

为提高测试系统的可靠性,对于组成测试系统的仪器、设备、元器件等都应考虑周围环境温度、湿度对其影响。尤其是精密仪器、仪表及计算机等,均应远离热辐射源,同时还应考虑仪器仪表本身的散热问题。由于环境温度过高会造成仪器仪表的老化,温度过大会使电气性能变坏,均影响仪表的精度。

为了提高测试系统的可靠性,对于组成测试系统的仪器设备、元器件等,都应当考虑周围环境的冲击、振动对其系统的影响。使用精密仪器时应选用防震、防冲击的试验台。

为提高测试系统的可靠性,要注意提高测试系统的电磁兼容性。电与电磁干扰除来自外部电机、大功率继电器、电源、脉冲源等外,同时也来自测量链各仪器、设备的相互连接所带来的干扰。因此对一个优秀的测试系统则要求它既具有抗外部的

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。

为提高测试系统的可靠性,要考虑系统的维修性。维修的目的首先要保证测试系统安全运行,其次是当故障发生时,能迅速地恢复其功能。维修有两种形式,一种形式是事前维修,其目的是为增加系统的可靠性,减少二次失效数,减少不能工作的时间,以增加其有效度,降低维修成本。其工作内容为定期服务,如加油、清洁、调整、校准、拧紧松动部件等,检查、更换、修理失效的冗余件,在损坏阶段前更换零部件;另一种维修方式是事后维修,此种维修是在预测失效以外的时间进行的,其目的是恢复功能。

四、实验室仪器的技术管理

技术管理包括仪器设备的选择与评价、验收与安装、使用与开发、维修与管理、更新与改造等。技术管理的目的是使实验设备经常处于完好可用状态,不断提高利用率。实验设备技术的好坏,直接影响科研和教学,影响仪器功能的发挥。

(一)仪器设备的选择与评价

实验室仪器的技术管理是重要的一环,我国传统的设备管理,往往是从仪器设备的使用阶段一开始就忽视了设备的选择这一环,结果造成了有些仪器设备的积压、浪费和不合理使用。

选择仪器设备时,总的原则是技术先进、经济合理。实验室仪器的添置是根据科研和教学工作的需要提出的,在购置前一般要查阅资料、进行社会调查,了解仪器概况,以及技术性能、可靠性和维修性等指标。选择仪器设备时应考虑的原则为:

1. 使用性

指仪器设备的效率、性能、内存等一系列技术参数。

2. 可靠性

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做到以下几点：

1. 专人操作

操作人员要具有高度的责任心，是用好、管好仪器设备的关键。

2. 为仪器设备创建文明环境

仪器设备布置合理、清洁卫生，要防尘、防潮、恒温、防振等。

3. 建立一套合理的使用制度

要正确合理地使用仪器设备，制定各项管理制

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要途径。由于原有的基础可以利用，因此，一般具有投资少、时间短、收效快的优越性。当然在进行改造和更新时，要特别注意其经济效益，要充分做到物尽其用。

2. 仪器设备服务年限与报废

(1) 仪器设备的服务年限可以代表一个国家的装备水平。一般是新生产的设备在性能和效率上远远优于旧仪器设备。役龄越短仪器设备越先进。

(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。

第二章 对实验室及工作人员的基本要求

第一节 实验设备和物质管理

一、实验设备在实验室中的地位和作用

众所周知,科学仪器和技术装备的水平是科学发展水平的重要标志之一。对于科学研究而言,科学仪器和实验手段是先决条件。一个研究课题是否可行,首先决定于所提供科学仪器和技术装备的可能性,因而在可行性方案论证中必须注意器材方案的论证,否则将会导致实验手段不同而影响科研工作的进展。总之,科学研究如果离开了科学仪器和技术装备以及实验材料,将寸步难行。

二、实验设备的管理

实验设备的管理主要由三方面组成,即计划管理、技术管理和经济管理。

(一)实验室设备的计划管理

计划管理,就是为了达到一定的目标而作出的决策、措施及安排。它是用来指导、组织和协调实验室建设工作的一个手段,包括计划的编制、执行、检查、分析和总结等环节。

1. 编制计划的依据

仪器设备的计划编制是一项十分复杂和细致的工作,主要是应当根据科研任务、实验室建设规划、投资经费以及本单位设备的潜力和库存利用能力来加以编制。

2. 计划执行

按申请计划及订货卡片参加各种定货会议,落实申请计划。

3. 计划的检查与评价

对计划进行经常的检查,是实现计划的重要环节和措施。通过计划检查,可以及时地发现计划的实际执行与计划规定的任务是否相符,了解有关国家的有关方针政策的情况,并采取措施,保证计划的完成。

通过计划的总结和评价,可以衡量计划管理水平、总结工作的经验教训,以利于安排下年的设备计划。

(二)实验设备的技术管理

实验设备的技术管理,主要包括设备的选择与评价、验收与安装、使用与开发、维护与管理、更新与改造等。技术管理的目的,是保证实验设备经常处于完好可用状态,不断提高利用率。实验设备技术状态的好坏,直接影响科研的正常进行,所以说技术管理非常重要。

1. 设备的选择与评价

实验设备的选择,是实验设备管理的重要一环。我国传统的设备管理,往往是从设备的使用阶段开始,而忽视了设备的选择这一环,结果造成仪器设备积压、浪费和不合理使用。选择仪器设备要考虑到仪器的使用性、可靠性、节能性、维修性、环保性、耐用性、成套性以及灵活性。

目前仪器设备的发展趋势,一方面向大型化、自动化、高级化方面发展,同时也向小型化、微型化、简易化、廉价化方面发展,因此选择时要全面考虑以上诸因素,全面权衡其利弊。

对于设备的评价,主要是指仪器设备选购阶段的经济评价。在购置设备时,通过几种方案的对比、分析、选择最优方案,以获得经济性好的设备。

2. 设备的安装验收

对于新购置的仪器设备,把好验收关是非常重要的。把好验收关,不仅在经济上免遭损失,更重要的是保证科研正常进行。通过验收工作,可把种种隐患消除在投入运行之前,更新质量差的部件,确保仪器的正常运行。

通过技术验收可熟悉资料和仪器,消化实验技术,训练好管理队伍。接收验收不仅仅是接过一批设备,而且要接过新的实验技术。实验技术掌握得不好,就会在以后出现高档仪器低档使用的情况。

验收工作要做好组织、技术、条件三落实。首先要组织有经验的队伍进行验收工作;其次要进行学习,了解设备的各项技术指标和操作方法,做到心中有数;最后要确定仪器存放与安装的地点,如有的设备要求恒温空调等。

对于进口设备的验收非常重要,一定要根据技

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要求。设备在运行过程中,由于外部负荷、内部应力、腐蚀介质和自然侵蚀等因素的影响,仪器的个别部件或整体,都会因此改变尺寸和形状、降低机械强度、刚度和精度等级。为保持仪器设备的性能、延长使用期限,就必须做好仪器设备的维护、保养和及时的修理工作。

维护保养工作的主要内容有清洁、润滑、防腐、检查零部件完整与否以及对仪器仪表进行定期通电防潮等。

设备修理应当坚持以预防为主的原则。常采用四种修理制度,即事故修理、计划预防维修、改造维修和维修预防。

设备修理与维护保养二者是相辅相承的,维护保养工作做得好,就可以延长使用寿命,从而延长修理周期,减少修理工作量;计划检修工作做得好,日常维护工作也就容易。

5. 更新与改造

对于现有仪器设备的技术改造,是加速实验手段现代化的重要途径。由于原有的基础可以利用,主要是改进测试方法和改装部分零部件,使之发挥更高的效率。它具有投资少、见效快的特点。

在更新过程中应当把购置新设备和自力更生地改进老设备结合起来。在设备改造过程中,既要考虑设备的自然寿命,也要考虑到设备的经济寿命,超过仪器设备的经济寿命而勉强使用也是不可取的。总之,要做到物尽其用。

(三) 实验设备的经济管理

实验设备的经济管理包括有经费、帐、物、卡管理,使用效益考核,报损、报废管理等。

三、实验物质的管理

实验物质的管理工作是实验室管理的一项重要

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。

(三) 危险品管理

凡具有易燃、易爆和有毒害、腐蚀、放射性能的实验物质,在搬运、使用和储存保管过程中,如处理不当可能引起人身伤亡或财产损失,这类实验用物质称之为危险用品。

1. 危险品的分类

实验用物质当中的危险品,虽然也有工业品,如雷管、炸药等,但多数是化学试剂。尽管药品种类很多,但管理和使用的共性不外乎密封紧盖、避免光照、低温冷藏和安全保管四种情况。

根据它们的化学性质和储存要求,化学试剂危险品可分为五类:即爆炸性试剂、易燃性试剂、剧毒性试剂、腐蚀性试剂和放射性试剂。

2. 危险品的采购和运输

应当严格按照公安和交通部门的有关规定办理。

3. 危险品的储存保管

应安全第一,建立适宜的储存危险品仓库和必要的养护设备,并分类分级地进行储存和保管,必须严格执行管理制度。

4. 危险品的领用

要制定严格的领用手续制度。危险品剩余部分必须退入仓库,不得在实验室过夜。对危险性物品的领用、剩余、报废和损耗应有严格的记录。总之,应把对危险品的管理放在物质管理的首位。

第二节 实验室的环境 保护和安全防护

一、实验室的环境保护

在冶金、化工、生物类实验室中往往要排出一些有毒有害物质,造成大气和水质的污染。因此要

特别注意对实验废水-废气、废渣的处理以及某些有害物质污染的处理。

二、实验室的安全防护

实验安全防护包括实验人员的劳动保护、实验环境保护和实验设备保护。这里仅重点介绍实验的防护措施和防护设施。

1. 实验防护设施

(1) 防尘 尘埃是浮在空气中的极小微粒。凡是有空气流动的地方, 几乎均有灰尘, 其成分相当复杂。尘埃对仪器的精度和器件的表面粗糙度, 对样品的纯度和液体的澄明度、以及光线的亮度等均有直接影响, 因而实验室都需要防尘。防尘的办法有很多, 例如, 对防尘要求不太严格的实验室, 其房间要定期清洗; 对防尘要求严格的实验室, 其建筑物就要配备专门防尘设施。

(2) 防腐 仪器被腐蚀的现象是由多种原因造成的, 对于防止有害气体的腐蚀, 最有效的方法是隔离, 设置专门的防腐罩, 或采取其它防护措施。

(3) 防潮 由于仪器的外壳和内部构件多系金属材料, 实验室内的潮湿空气容易使之生锈而损坏。因此防潮包括房间空气的干燥和仪器设备的防潮两个方面。

(4) 防振 防振, 包括环境和仪器本身两个方面的防振。减少环境振动对仪器设备的影响, 是多数实验室的要求; 减少仪器本身的振动, 是某些实验室的要求。

防止仪器的振动, 可采用紧固仪器并加以衬垫、吸盘等方法; 防止实验室附近环境的振动的影响, 可设置各种防振台, 或建造专门的防振基座。

(5) 防火与灭火法

1) 平时要注意偶然着火的可能性, 准备适用于各种情况的灭火材料, 包括消火砂、石棉布、毯子以及各类灭火器。消火砂要经常保持干净, 且不可有水浸入。

2) 电线着火时须关闭总电门, 立即切断电源, 再用四氯化碳灭火器熄灭已燃烧的电线并及时通知值班电气工人。不许用水或泡沫灭火器熄灭燃烧时的电线。

3) 常用灭火器类型及适用范围如表1-2-1所示。

实验室设备用的灭火器, 须按时检查开关、调换药液。临时使用前需检查喷嘴是否畅通, 如果有阻塞, 应用铁丝疏通后再使用, 以免造成爆炸事

故。

表1-2-1 常用灭火器类型及适用范围

类型	药液成分	适用范围
泡沫式	$H_2SO_4 \cdot NaHCO_3$	用于非油类及电器失火的一般火灾
高倍数泡沫	$Al_2(SO_4)_3 \cdot NaHCO_3$	适用于水源集中、泡沫容易堆积等场合的火灾, 如大型油池、室内仓库、油类、木材纤维等
二氧化碳	液体 CO_2	适用于电失火
干粉灭火	粉末主要成分为 $NaHCO_3$ 等盐类物质, 加入适量润滑剂和防潮剂	适用于扑救油类、可燃气体、电器设备、精密仪器、文件记录和遇水燃烧等物品引起的火灾
四氯化碳	液体 CCl_4	适用于电气灭火
	CF_2ClBr	灭火效果好, 主要应用于失火的油类、有机溶剂、高压电气设备、精密仪器

(6) 防爆 要充分认识实验室发生爆炸事故的危害性和可能性。例如, 化学试剂的分解、化合反应导致爆炸、动力机械的压力和真空能导致爆炸、某些容器的碰击产生爆炸等等。为了防止爆炸, 防爆管理是十分重要的。

2. 实验防护安全措施

搞好实验防护要做到预防细菌和病毒的危害、预防灰尘的危害、预防毒气的危害和预防有害光的危害等等。

三、安全操作守则

为了防止事故, 确保安全, 对生产设备以及各种实验设备在技术上采取安全措施的同时, 也应采取各种方法使操作人员不要有引起事故的不安全行为。这就必须进行安全教育, 还要制定安全操作守则, 以便使操作人员懂得在各种危险场合下应采取的措施, 并使他们有良好的安全动作习惯和安全作业的操作方法。为此, 对从事实验室工作人员制定了如下的安全操作守则。

1) 在使用电时, 必须事先检查开关、电动机和机械设备以及各种测试仪器的各部分是否安置妥善。

2) 开始工作或停止工作时, 必须注意开关彻底

合上或拉下。

3) 注意电线的干燥度, 遵守使用仪器的操作规程。离开房间要切断仪表的电气加温电源。

4) 在更换保险丝时, 要按负荷量选用合格保险丝, 不得加大或用铜丝代替使用。

5) 在实验室内不要有裸露的电线头, 不要用裸露电线头接通电灯、仪器或电动机。要记住实验室内发出火花的危险性, 因空气中可能有构成爆炸混合物的可燃气体或蒸气。

6) 电气开关箱内, 不准放任何物品, 以免导电燃烧。

7) 严禁用铁毛刷清扫电门和用湿布擦电门。

8) 凡电、气动设备发现过热现象应立即停止运转。

9) 停止电源时, 要断开一切加温设备和其他一些仪表, 只接通一只检查灯。当电灯明亮时, 指示电源已恢复正常情况, 然后遵照开始接通仪器时所规定的一切预防方法重新进行工作。如果电源中断时, 忘记断开一切开关, 当电源再接通时, 有可能使仪器损坏。此外, 在同一电源线上接通过多仪器时, 将造成电线负载过重, 有时可以引起电线着火或击穿绝缘。

10) 禁止在电气设备或线路上洒水, 以免漏电。

11) 凡使用110V以上的电源时, 仪器的金属外壳必须安装地线。要使用有绝缘手柄的工具。

12) 用高压电源工作时, 要穿上胶鞋并戴上橡皮手套。站在橡皮地毯上, 不要盲目自信而带电操作。

13) 实验室中所有电气设备, 不得私自拆动及随便进行修理。

14) 受到电源伤害时, 要立即用不导电的物体把触电者从电源挪开, 同时采取措施切断电源。把触电者移到有新鲜空气的地方。进行人工呼吸并迅速送往医院。

第三节 合理使用仪器与获得精确数据的关系

一、测量系统的设计原则

在设计一个测量系统时应当根据三个原则来考虑, 即选用最佳化的系统方案; 可靠和节约; 建立系统的数学模型。

(一) 最佳化的系统方案

对于一个巨大规模的测试系统, 如何合理地选

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, 以便获得高精度和可靠性。首先利用系统工程的方法, 先把一个大目标分解成一些小的目标; 其次根据总的技术指标来确定各个分系统的技术指标, 然后协调系统中各单元仪表的关系, 从而保证总体的性能和水平; 最后, 要根据总的要求, 合理地启动仪表, 确定最优工序, 使测试工作有条不紊、秩序井然。

(二) 可靠和节约

可靠性和稳定性是决定一个系统能否运用的关键指标。一个测试系统可能由多个测试仪器组成, 某个大型仪表可能由几千甚至于几万个元件组成, 某些元件性能出了毛病, 系统的性能和可靠性就会降低, 甚至完全失灵。为此系统的稳定性和可靠性是非常重要的。当系统运行不正常时, 如何确定故障的部位、判断故障的仪表, 这就必须利用系统的观点来进行判断, 而不能孤立地寻找。

效果费用分析, 是把经济指标和技术指标联系起来加以考虑。假如一个系统的技术指标性能优秀, 但成本昂贵, 运行费用也高; 而另一个系统的技术指标性能较低, 但成本便宜, 运行费用也低。两个系统哪个好一些? 这类问题在科学技术工作中会经常遇到。

在处理上述问题时就应当利用系统的观点分析考虑, 把事情办好。所谓系统的观点就是把一个系统的内部各个环节、各个部分, 看作互相联系、互相影响、互相制约的; 把一个系统的内部和外部环境看成互相联系、互相影响、互相制约的。总之, 应利用系统观点进行综合评定, 最后确定测试系统的方案。

(三) 系统的数学模型

对于一个系统, 不只是定性地, 而且要求定量地进行描述。为了对系统进行定量的描述, 要求对系统引入数学模型。例如, 对一个网络, 输入输出特性、响应特性、以及控制论中的反馈、信息等, 在系统研究中都很重要。常用的系统数学模型分类为:

1. 线性与非线性模型

常微分方程是描述系统的一个重要工具。借助于系统的输入量 $x(t)$ 和输出量 $y(t)$ 之间的微分方程

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y$$

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

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 $\alpha y_1(t) + \beta y_2(t)$ 。

对于线性系统, 叠加原理不仅对于输入信号所对应的输出信号是成立的(即微分方程描述系统时的特解), 而且对于初始条件所对应的输出也是成立的(即通解)。

2. 参数与非参数模型

系统的数学模型可分为参数和非参数模型。如脉冲响应、阶跃响应、频率响应等称为非参数模型; 状态方程、微分方程、差分方程、传递函数等称为参数方程。

3. 确定性与随机性的模型

信号与系统是确定性的, 描述其特性的数学模型是确定性的数学模型。例如, 前面所讲的参数与非参数模型都属确定性的模型。描述随机信号、或系统对随机信号的响应的数学模型, 称为随机数学模型。

4. 连续系统与离散系统的模型

描述连续系统的数学模型有: 微分方程、传递函数、状态空间等。离散系统也有对应的各类数学模型、差分方程、离散传递函数、离散状态空间等。

二、测量系统的建立与测试仪器的选择

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:

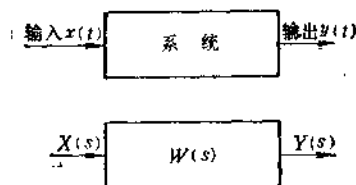


图1-2-1 线性系统的结构

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = W(s) \quad (1-2-2)$$

时域动态性能的好坏, 即 $y(t)$ 对 $x(t)$ 复现的好坏, 通常按脉冲响应和阶跃响应来衡量。

阶跃响应是指系统的输入 $x(t)$ 为阶跃函数时系统的输出 $y(t)$ 。为了与其它输出相区别, 阶跃响应用 $c(t)$ 表示。阶跃函数 $x(t)$ 如式(1-2-3)表示, 用曲线表示如图1-2-2a所示, 阶跃响应曲线如图1-2-2b所示。

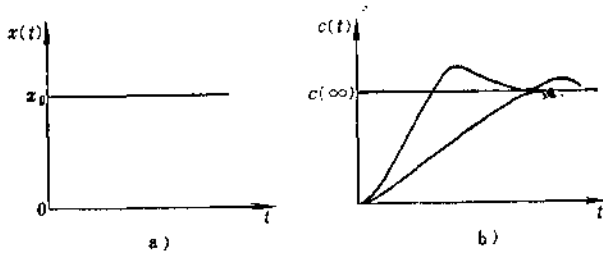


图1-2-2 阶跃函数及其响应

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 $c(t)$ 曲线定义时域动态性能

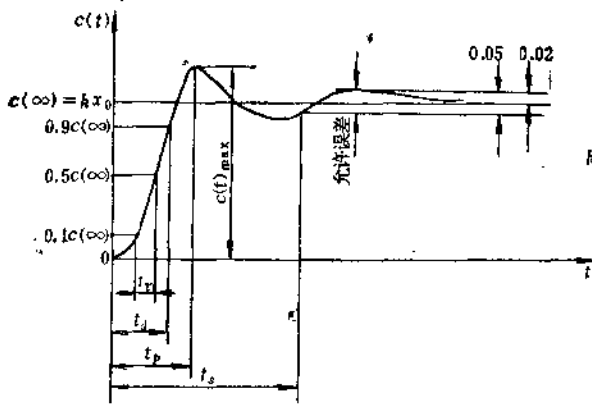


图1-2-3 表示性能指标的阶跃响应曲线

指标, 其阶跃响应曲线如图1-2-3所示。

图上 $c(\infty)$ 定义如下:

$$c(\infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} c(t) = kx_0 \quad (1-2-5)$$

$c(\infty)$ 表示为阶跃输入时, 系统输出的稳态值, 实际上 $c(\infty)$ 取其输出 $c(t)$ 无明显变化时的值。 x_0 为输入 $x(t)$ 阶跃值的大小, k 为系统的静态传递函数。

时域的动态指标:

1) 延迟时间 t_d 响应曲线第一次达到稳态值一

半所需时间, 叫延迟时间。

2) 上升时间 t_r 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 σ 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

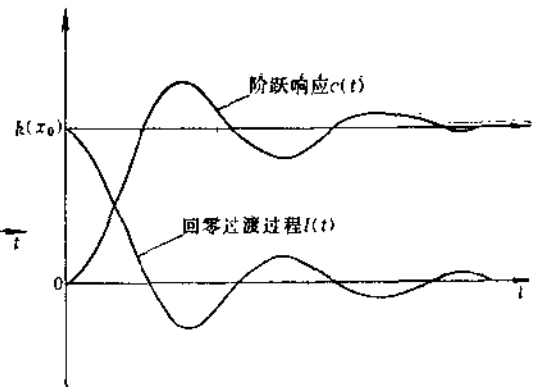


图1-2-4 阶跃响应 $c(t)$ 与回零过渡过程 $l(t)$ 关系

$$\left. \begin{aligned} l(t) &= kx_0 - c(t) \\ c(t) &= kx_0 - l(t) \end{aligned} \right\} \quad (1-2-6)$$

$c(t)$ 与 $l(t)$ 的曲线如图1-2-4所示。

这样处理相当于把回零过渡过程看成负阶跃响应。动态品质指标与回零过渡过程的关系如图1-2-5所示。

(3) 方波响应与阶跃响应的关系 当系统的输入 $x(t)$ 为方波脉动时, 对应的系统输出称为方波响应, 用 $y(t)$ 表示。方波脉动 $x(t)$ 具有以下的特

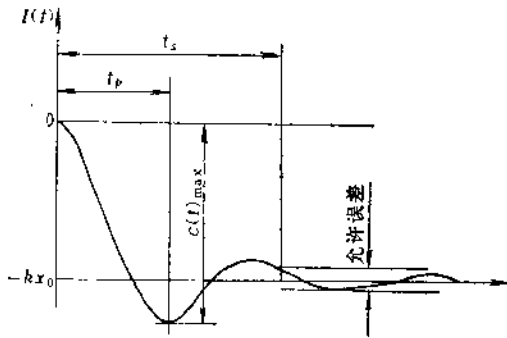


图1-2-5 回零过渡过程曲线上定义动态性能指标

性。

$$x(t) = \begin{cases} x_0 = \text{常数}, & 0 < t < t_0 \\ 0, & t < 0, t_0 < t \end{cases} \quad (1-2-7)$$

对应的曲线如图1-2-6所示。因此方波脉动函数 $x(t)$ 可以看作是一个 $t=0$ 开始高度为 x_0 的阶跃函数，再叠加一个从 $t=t_0$ 开始的高度为 x_0 的负阶跃函数，即

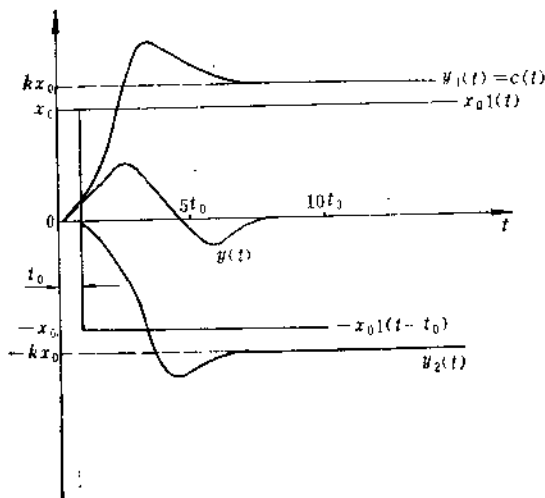


图1-2-6 由方波响应 $y(t)$ 求阶跃响应 $c(t)$ 的作图法

$$x(t) = x_0 \times 1(t) - x_0 \times 1(t - t_0) \quad (1-2-8)$$

如图1-2-6所示，设 $y_1(t)$ 是系统对阶跃作用 $x_0 1(t)$ 的响应， $y_2(t)$ 是系统对阶跃作用 $-x_0 1(t - t_0)$ 的阶跃响应，若系统是线性的，则有

$$y_2(t) = -y_1(t - t_0) \quad (1-2-9)$$

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) = y_1(t) - y_1(t - t_0)$$

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

如果通过动态测试获得了系统的方波响应 $y(t)$ ，则根据式(1-2-10)所示的关系式，可以利用作图法求得系统的阶跃响应 $c(t) = y_1(t)$ 。先按 t_0 的长度将时间 t 轴分段，由于在 t_0 阶段中， $y_1(t - t_0) = 0$ ，故有 $y_1(t) = y(t)$ ，以后各段的 $y_1(t)$ 乃是该段的 $y(t)$ 与其相邻的前一段 $y_1(t)$ 之和。这样随着时间的推移，就可以由方波响应求得完整的阶跃响应。

(4) 脉冲响应与阶跃响应的关系 设 $g(t)$ 为系统的脉冲响应， $c(t)$ 为系统的阶跃响应函数，由控制理论可知：

$$g(t) = \frac{dc(t)}{dt} \quad (1-2-11)$$

$$c(t) = \int_0^t g(t) dt$$

当通过动态测试测得 $g(t)$ 时，可以利用作图法得到 $c(t)$ 的曲线，如图1-2-7所示。

1) 将 $g(t)$ 曲线与时间 t 轴所夹面积分为若干个单位面积，单位面积愈小愈精确。

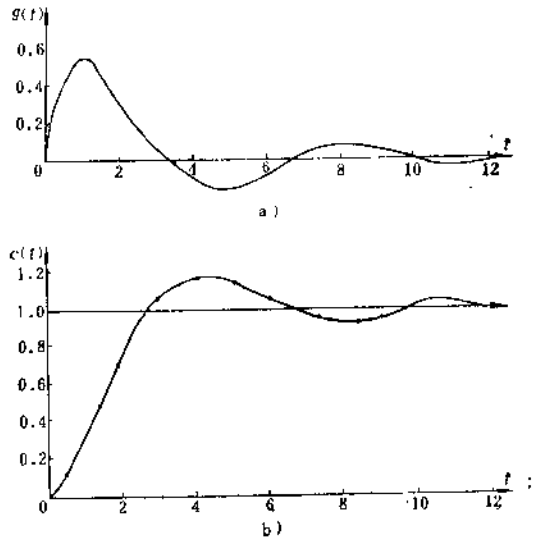


图1-2-7 由脉冲响应 $g(t)$ 求阶跃响应 $c(t)$ 的作图法

2) 计算出任一时间 t_i 之前单位面积的代数和 n_i 。位于时间 t 轴上方为正面积，时间 t 轴下方的为负面积。

3) 取 $g(t)$ 达到平直段的面积为 n_∞ ，以 n_i/n_∞ 的值作纵坐标，以 t_i 为横坐标所得曲线就是按相对量绘制的曲线。当取 $g(t)$ ， $c(t)$ 为相对量时，则有

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

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 ω ，可以正弦变化的信号，如图1-2-8所示。

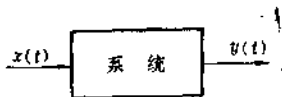


图1-2-8 线性系统

输入 $x(t) = x \sin \omega_i t$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。在某一频率 ω_i 的正弦波作用下，等系统稳定后，测出系统稳定输出 $y(t) = Y(\omega_i) \sin[\omega_i t + \phi(\omega_i)]$ 的幅值 $Y(\omega_i)$ 和相位 $\phi(\omega_i)$ ，则幅值比为系统的幅频特性，即

$$A(\omega_i) = \frac{Y(\omega_i)}{X}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1-2-14)$$

相频特性为

$$\phi(\omega_i) = \varphi(\omega_i) - \theta = \varphi(\omega_i), i = 1, 2, \dots, n \quad (1-2-15)$$

从式(1-2-15)中取输入正弦波的初相角为0，取 ω 为横坐标，取与 $\omega = \omega_i$ 相对应的 $A(\omega_i)$ 和 $\phi(\omega_i)$ 为纵坐标，就得图 1-2-9 所示的频率特性曲线，其中 K 为系统的静态传递函数。

频率特性的品质指标如图1-2-10所示。

1) 谐振峰值 A_m

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

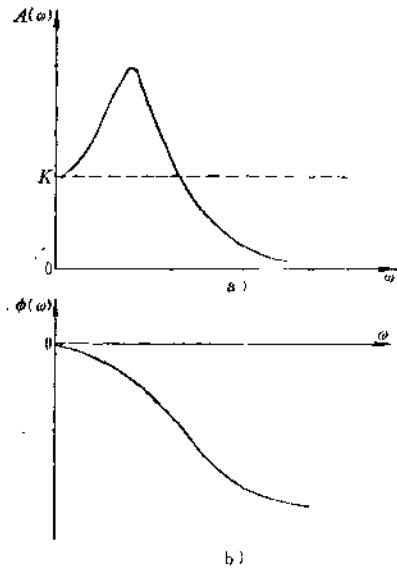


图1-2-9 频率特性

式中， ω_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~ ω_g) ω_g 取决于给定值，当 $|1 - A(\omega_g)| = 2\%$ 时， ω_g 可以表示为 ω_2 ；当 $|1 - A(\omega_g)| = 5\%$ ， ω_g 可表示为 ω_0 。(0~ ω_g) 给出了频

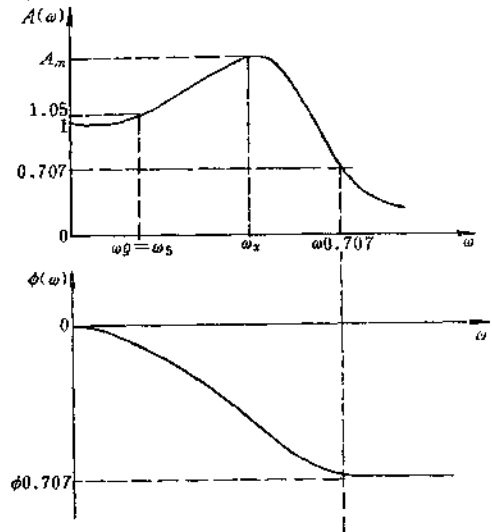


图1-2-10 表示品质指标的频率特性

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:

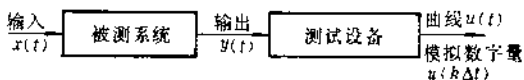


图1-2-11 系统结构框图

(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 ω_e 的选择 对于测量设备的要求应当具有足够的工作频带 ω_e , 总的要求是 ω_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 ω_n —— 测试设备的固有频率;

ω_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 ω_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。

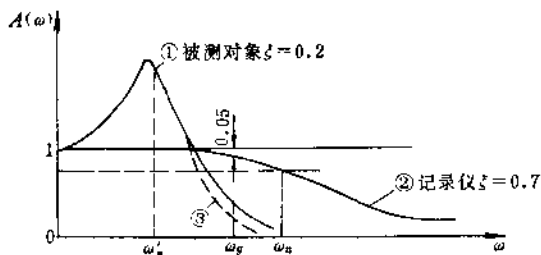


图1-2-12 测试设备的频率特性对测量的影响

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。

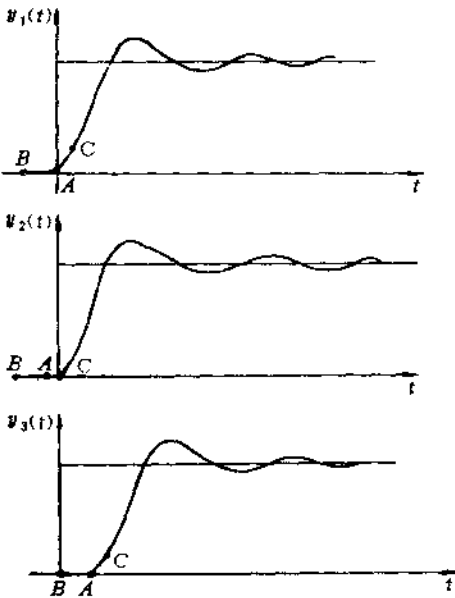


图1-2-13 动态测量中计时起点的变动

因此，在动态测量中可以不用集平均的方法来获得最可信的被测量 $\bar{y}(t)$ ，而是对测试数据采用下面的处理方法。

1) 借助计算机对任一次测得的 $y_i(t)$ 进行平滑处理，对减少量化误差和其它偶然误差的影响。所谓平滑处理，就是对 $y(t)$ 的采样数据 $y_k = y(k\Delta t)$, ($k=1, 2, \dots, m$) 进行平移的多项式拟合。

2) 用平滑处理后的数据估计系统的动态品质指标和回归系统的参数模型。必要时，可将多次按上述方法得到的品质指标或模型参数分别取算术平均，并用平均值作为系统的品质指标或模型参数。以二阶系统为例，根据 N 个平滑后的样本回归得到 N 个固有频率 ω_{n_i} 和阻尼 ξ_i ，则系统的固有频率 ω_n 和阻尼 ξ 可取下面的算术平均，即

$$\begin{aligned} \omega_n &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_{n_i} \\ \xi &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \xi_i \end{aligned} \quad (1-2-19)$$

3. 干扰的影响

动态测试中总是存在干扰 $n(t)$ 的影响，若不采取有效措施，在被测信号 $y(t)$ 较弱时，干扰 $n(t)$ 甚至能将被测信号 $y(t)$ 淹没。

对于动态测试数据进行平滑处理，也能减少干扰的影响，但效果不显著。为消除和减少干扰的影

响，可从下述几方面着手解决。

- 1) 要正确连接测试线路的地线，并采取有效的屏蔽措施。
- 2) 增强被测量的信号强度。
- 3) 进行滤波处理。滤波的方法很多，这里只介绍常用的相关滤波法。

相关滤波法测量系统频率特性。如图1-2-14所示的测量系统频率特性的方法，干扰 $n(t)$ 将全部出现在系统的输出 $y(t)$ 中。

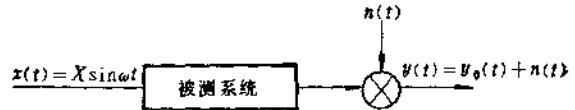


图1-2-14 干扰 $n(t)$ 对输出的影响

如果改用图1-2-15所示的方法测量频率特性，则可以大大地减少干扰的影响。

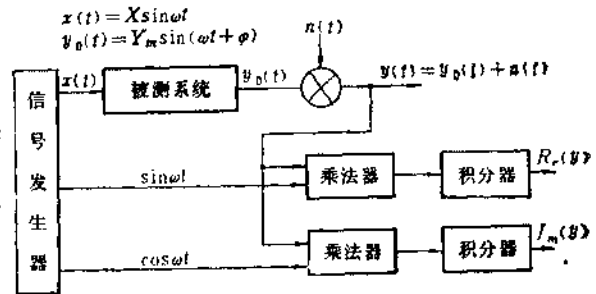


图1-2-15 利用相关滤波测量系统的频率特性

由图1-2-15可得到：

$$\begin{aligned} R_c(y) &= \frac{2}{kT} \int_0^{kT} \left[Y_m \sin(\omega t + \varphi) \right. \\ &\quad \left. + n(t) \right] \sin \omega t dt \\ &= \frac{2}{kT} \left[Y_m \cos \varphi \int_0^{kT} \sin^2 \omega t dt \right. \\ &\quad \left. + Y_m \sin \varphi \int_0^{kT} \sin \omega t \cos \omega t dt \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{kT} n(t) \sin \omega t dt \right] \quad (1-2-20) \end{aligned}$$

式中 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ —— 周期。

利用如下的正交关系，即

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

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

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

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重要。例如, 选择压电式传感元件测压力比利用电容式或电感式传感器测压力, 其工作频带可以高一至两个数量级。但要求与压电式传感器相匹配的电荷放大器有相当高的频率响应。

2. 正确地选择与传感器匹配的放大器

许多传感器需要配备放大器(有些放大器包括信号放大、调制或解调、滤波等, 有的还包括误差补偿在内)和记录器。这时要记录好快速变化的信号, 除了采用宽频带的传感器之外, 应使放大器与记录器的频带宽度与传感器相同。此时应当利用各环节的幅频特性来分析。例如, 测量系统和传感器

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。

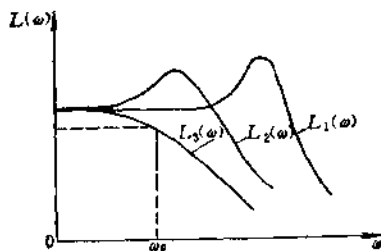


图1-2-17 三个环节的对数幅频特性曲线

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等。

在整个测量系统中, 要特别注意各环节的匹配。例如, 阻抗匹配、电平匹配等。此外还要考虑各部件工作频带的配合。例如, 进行动态检测时, 不能只注意传感器的工作频带是否合适, 还应考虑整个测量系统的工作频带是否合适。

4. 做好结构设计

对于传感器的结构设计是否合理, 直接影响其工作频带。例如, 利用热电偶测温度, 选择偶丝直径小些, 不仅可以提高其频率响应, 同时更接近于

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。

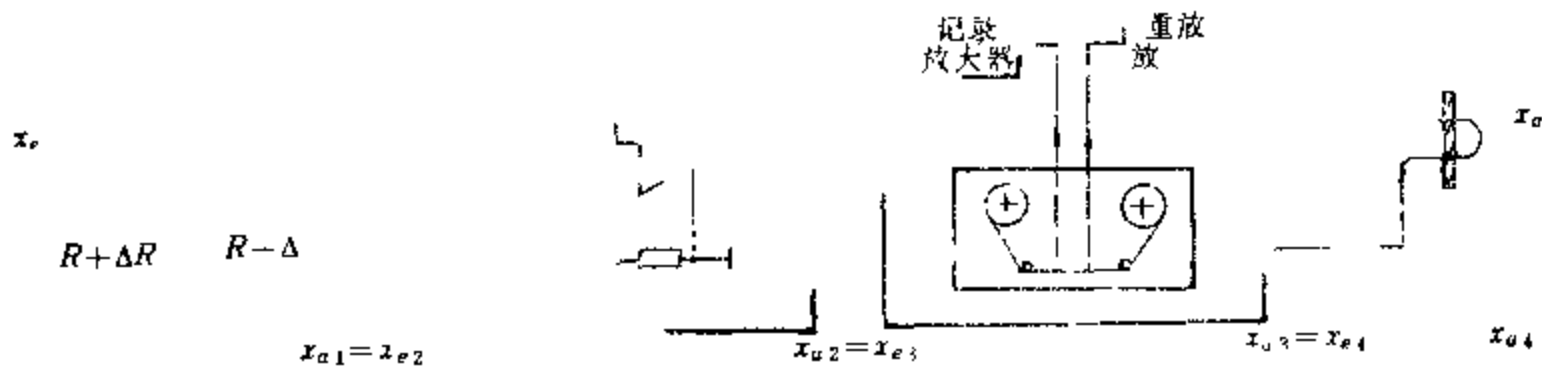


图1-2-18 动态应变测量链

设 $x_{e1} = G_1 x_{e1}$ $x_{e2} = G_2 x_{e2}$
 $x_{e3} = G_3 x_{e3}$ $x_{e4} = G_4 x_{e4}$ (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

$$G_{总} = |G_1| |G_2| |G_3| |G_4| e^{j(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4)} \quad (1-2-31)$$

$|G(j\omega)|$ 幅值误差 $\left| \frac{x}{x_0} \right|$ 与频率（用幅频

特性表示）的关系，乘以100则可用百分数表示。

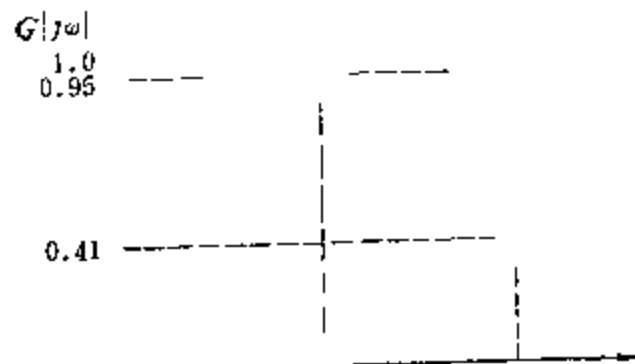
采用对数表示衰减量为

$$\delta = 20 \lg |G| \quad (1-2-32)$$

若用分贝(dB)来表示误差，则可以使式(1-2-29)表示得更清楚。这时由式(1-2-31)

假如图1-2-18中测量链的各环节皆为“平缓”幅值特性，即 $|G(j\omega)| \leq 0.95$ ，则相应将对数衰减为 -1.68dB ，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 -12dB ，而且 $\left| \frac{x_o}{x_e} \right| = 0.25$ 时，这相当于幅值误差为75%。



Handwritten notes and diagrams at the bottom of the page, including a small sketch of a measurement setup and some calculations.

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 $K = f/f_0$, 得到一个对系统评定很有用的表1-2-2。

表1-2-2 相对幅度误差 γ 和测量频率 f 与自振频率 f_0 之比 K 的误差

$\gamma(\%)$	1	2	3	5	10
$K(\%)$	38	45	50	65	83

从表中可以看出, 当动态测量误差允许为 $\gamma = 3\%$ 时, 测试系统的工作频率可以达到自振频率的 50% 。

在许多应用场合 (例如开关接通现象) 需要表示的是时间特性, 而不是频率特性。为此在描述系统参数时, 可用系统的响应时间 t_R 或者用上升时间常数 τ 来表示。

对于一个应用于快速测量的动态测量链, 要特别考虑仪器及传感器的截止频率与上升响应时间, 因为这两个参数对于是否能正确无误地传递被测量起很重要的作用。

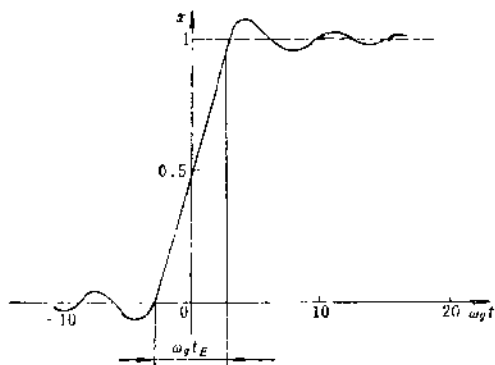


图1-2-20 阶跃函数和起振时间 t_R 的关系

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 $\omega_g t_R$, 计算其陡度时, 有如下关系:

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

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度差的宽频带。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“脉冲特性”, 也即是在起振过程中无超幅振荡。这可以用上升时间 τ 来衡量, 如图1-2-21所示。

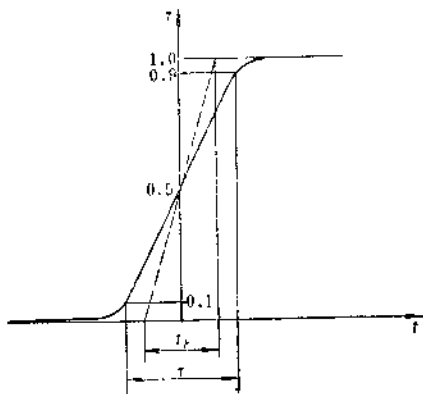


图1-2-21 起振时间 t_R 和上升时间 τ 的定义

图1-2-21给出了 t_R 与 τ 之间的差别。其中 τ 表示测量值从额定值的 10% 上升到 90% 所需的时间。在高斯传递函数的有效条件下, τ 和 t_R 值之差甚小, 即

$$\tau = 1.022t_R \quad (1-2-36)$$

“高斯”传递中的上升时间仅比起振时间高约 2% 。假如从 0Hz 开始, 则上升时间 τ 与带宽 B 或截止频率 f_g 之间的关系也比较重要。当频率 $f = B$ 时的相对幅值衰减为 $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 3\text{dB}$ 。按高斯传递函数计算起振过程时, 式(1-2-35)变成下式

$$\tau = \frac{0.34}{B} \quad (1-2-37)$$

而对 0Hz 传递则为

$$\tau = \frac{0.34}{f_g} \quad (1-2-38)$$

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

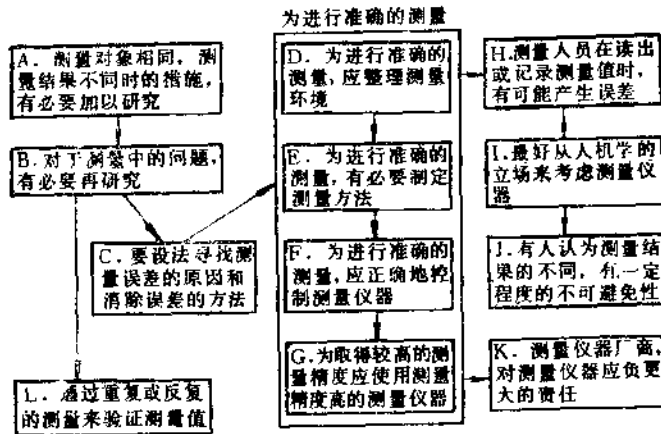


图1-2-22 制定准确的测量方案

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。

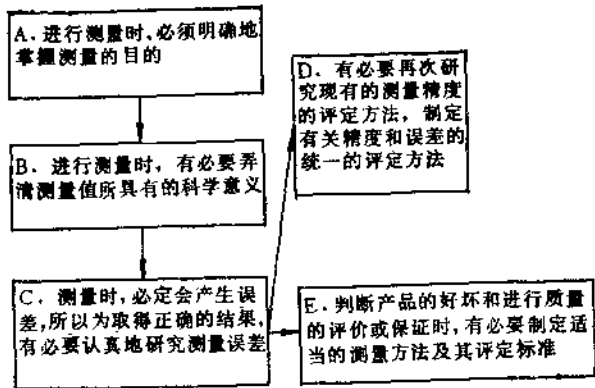


图1-2-23 测量结果的评定方法

(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。

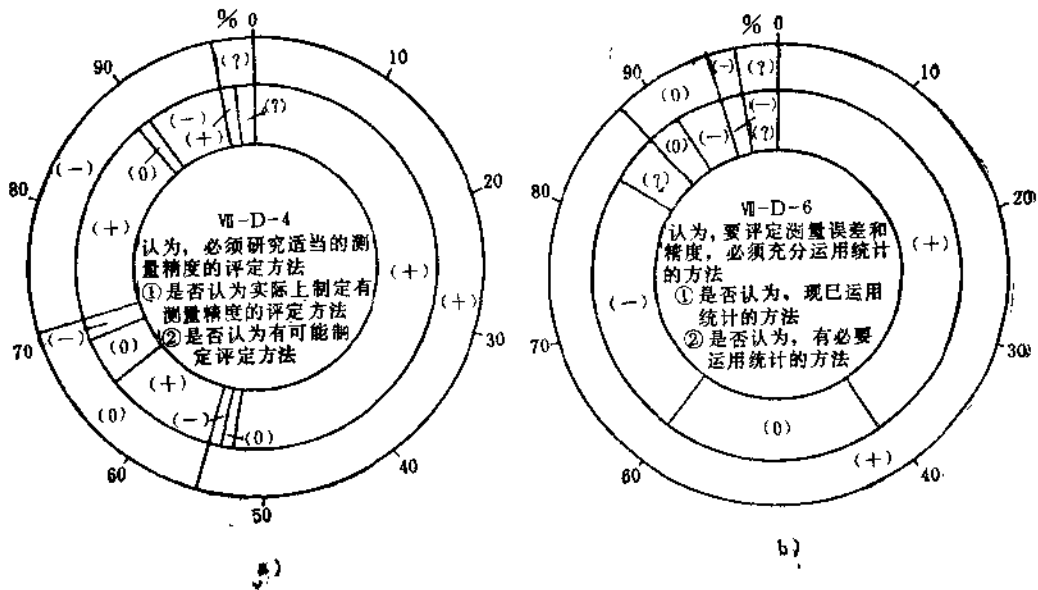


图1-2-24 测量精度的评定方法

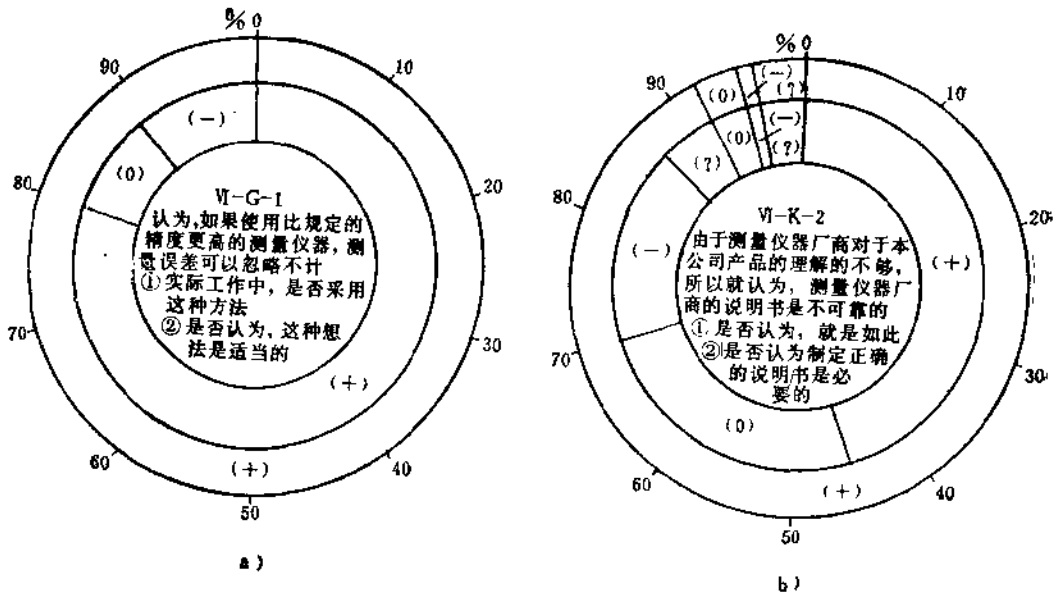


图1-2-25 传统方式认为测量仪器的误差

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，但未必要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。

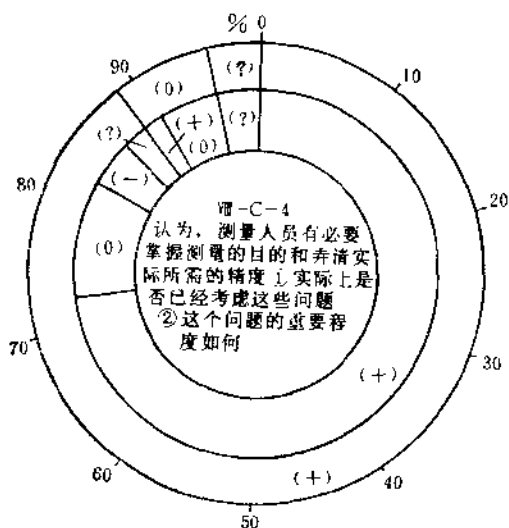


图1-2-26 测量人员掌握测量目的

(三) 实验设计的几个问题

实验设计中应注意三个问题：1) 微小误差准则与 $(e-n)$ 准则；2) 最佳实验条件的确定；3) 误差分配问题。

1. 微小误差准则与 $(e-n)$ 准则

在校准仪器、标定仪表与传感器或测量系统时，往往是用标准设备或标准仪表（简称标准器）来做标准的。这时，应该如何选择标准仪器呢？下面以使用标准仪器来检验电子仪器时，如何选择标准仪器和如何做出是否合格的判定为例，来说明这个问题。

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 σ_1 ，标准仪器的标准偏差为 σ_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，才能把标准仪器的误差作为满足可忽略的条件对待。

如果仪器的偶然误差较小，只考虑其系统误差时，设受检仪器的允许误差为 a_1 ，标准仪器的容许误差为 a_2 ，则必须选择 $a_1/a_2 > 10$ 时，才能使标准仪器对检验结果的影响小于10%。这就是有人认为标准仪器的精度应比受检仪器的精度高一个数量级的根据。

如果仪器的系统误差与偶然误差均较显著时，则要求标准仪器的系统误差应小于受检仪器的1/10，偶然误差小于被检仪器的1/3，标准仪器的误差才可以忽略不计。这种认为校准仪器的误差小到可以忽略的条件，称为微小误差准则。

如果标准仪器的误差不可忽略，则受检仪器被检验出来的误差应保持在 $\pm(e-n)\%$ 之内才算合格，即应该在误差测量结果中扣除标准仪器所产生的误差。这就是 $(e-n)$ 准则。

例如，如果受检仪器的误差极限规定为 $\pm 3\%$ ，而标准仪器的误差极限为 $\pm 1\%$ ，则被检仪器的误差应保持在 $\pm(3-1)\% = 2\%$ 以内。这样作为出厂检验的要求，才能保证使出厂产品的误差可靠地保证在误差极限 $\pm 3\%$ 以内。否则，忽略了 $\pm 1\%$ 标准仪器的误差，仍按 $\pm 3\%$ 作为合格的判据，则实际上只能保持到 $\pm 4\%$ 的误差限。

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 Δy_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 Δy_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 Δl_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

方案中的误差方程式,并分配每项误差的允许值,以保证实验完成后能达到所要求的精度。

误差合成问题是知道各误差分量,如何计算总误差的问题;误差分配问题是知道总误差,如何合理分配给各误差分量的问题。

在产品和实验设计时,人们对误差的性质往往都不清楚,只好都按极限误差来分配,以使各项极限误差之和小于技术条件规定的总的允许误差。

设计时,往往要采用一些现成件,或参考一些元部件进行修改设计。这时,这些元部件的误差就采用它们已经达到的性能或它们规定的性能指标,作为已知数代入总误差方程式中。总的允误差减掉这些已知的误差项,便是那些未知的各项误差的允许值,然后将这剩下的允许值再平均分配给各项误差,或参照类似产品的误差作试分配,如总误差超过允许值,便要重新调整。在试分配与调整时,必须注意起主要作用的那些元部件。例如,某项误差 Δx_i 的系数 $k_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ 较大, $k_i \Delta x_i$ 所占的比例较大,便可多分配一部分给它。比如说,剩余的允许误差为 l' ,还要分配给 n 项误差,则每项的分配指标为 l'/n ,起主要作用的那项误差所占的指标就可以大于 l'/n 。这是产品和系统设计的情况。同样,实验设计时也类似,可先按初步设计的实验方案列出总误差方程式,然后将预计采用的实验仪器误差代入总误差方程式中。如总误差超差,再调整其中的某些仪器,调整时首先考虑更换误差较大的仪器。

为了使误差分配留有余地,以便给那些可能超差的部件留些储备量,在计算各部件的允许误差时,也可以用 $1.1n \sim 1.2n$ 来代替前面的 n ,即那些未知的 n 项误差的允许值,每项先分给 $l/(1.1n \sim 1.2n)$ 。待各元部件设计完毕后,将各项实际计算的误差相加,如总误差不超过允许值便可以了。如总误差超过允许误差,便要重新调整一下各环节的允许误差,直到总误差小于允许误差为止。

设计全新的产品,参考资料较少时,可以一开始便按平均分配的办法,将总允许误差 l 平均分配给 n 项误差,每项分配指标为 $l/1.1n$,然后再根据实际情况进行调整。

例如,要求测量流过电阻 R (约 10Ω) 的电流 I 的绝对误差小于 1mA 。当电阻两端的电压降约 100V 时,试选择适当的电阻、电压测量仪器,以保证上述电流测定的误差。由欧姆定律知:

$$I = \frac{U}{R}$$

测量电流的误差方程式为

$$\begin{aligned} \Delta I &= \frac{\partial I}{\partial U} \Delta U + \frac{\partial I}{\partial R} \Delta R \\ &= \frac{1}{R} \Delta U - \frac{U}{R^2} \Delta R \end{aligned}$$

用极限误差来表示,则有

$$I_l = k_1 I_u + k_2 I_R$$

式中 I_l ——电流的允许极限误差;

$$k_1 = 1/R = 1/10 = 0.1,$$

I_u ——电压表的极限误差;

$$k_2 = U/R^2 = 100/10^2 = 1,$$

I_R ——欧姆表的极限误差。

现规定 $I_l = 1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$,如按平均分配的办法,则 $k_1 I_u = k_2 I_R = 0.5 \times 10^{-3}\text{A}$,由此得电压表的允许极限误差为

$$I_u = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{k_1} = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{0.1} = 5 \times 10^{-3}\text{V}$$

相对误差为

$$\delta_u = \frac{I_u}{100\text{伏}} \times 100\% = 5 \times 10^{-5}\%$$

故要求电压表的精度为 0.005% 。

同理,欧姆表的允许极限误差为

$$\begin{aligned} I_R &= \frac{0.5 \times 10^{-3}}{k_2} = \frac{0.5 \times 10^{-3}}{1} \\ &= 0.5 \times 10^{-3}\Omega \end{aligned}$$

相对误差为

$$\begin{aligned} \delta_R &= \frac{I_R}{R} \times 100\% = \frac{5 \times 10^{-4}}{10} \times 100 \\ &= 5 \times 10^{-3}\% \end{aligned}$$

故要求欧姆表的精度也为 0.005% 。

若数字电压表的精度可保证 $1 \times 10^{-5}\%$,则测量 100V 时, $I_u = 100 \times 10^{-5}\% = 1\text{mA}$, $k_1 I_u = 0.1 \times 0.001 = 1 \times 10^{-4}\text{A}$,由欧姆表的误差所引起那部分误差应为

$$k_2 I_R = I_l - k_1 I_u = 0.001 - 1 \times 10^{-4} = 9 \times 10^{-4}\text{A}$$

$$I_R = \frac{9 \times 10^{-4}}{k_2} = \frac{9 \times 10^{-4}}{1} = 9 \times 10^{-4}\Omega$$

采用 10Ω 的档,则要求欧姆表的相对误差为

$$\delta R = \frac{0.0009}{10} \times 100\% = 0.009\%$$

故要求欧姆表的精度为0.009%。

由这计算结果可以看出，若将总误差平均分配给电压表与欧姆表，则它们都要有0.005%的精度。如果采用 $1/10^6$ 的数字电压表，则对欧姆表的要求可降至0.009%。

前面说过在误差分配时必须注意各项误差的系数 $k_i = \partial f / \partial x_i$ 的大小。这例题也说明了这个问题。下面再举几个例子。

例如： $f = y_1 y_2^2$

$$\begin{aligned} \Delta f &= -\frac{\partial f}{\partial y_1} \Delta y_1 + \frac{\partial f}{\partial y_2} \Delta y_2 = y_2^2 \Delta y_1 \\ &\quad + 2y_1 y_2 \Delta y_2 \\ &= \frac{f}{y_1} \Delta y_1 + 2 \frac{f}{y_2} \Delta y_2 \end{aligned}$$

由此可见，相同的 Δy_1 与 Δy_2 ，对总误差的影响不同。

若预先估计实验中只有系偶误差与偶然误差，且各误差间不相关。例如实验结果为

$$\begin{aligned} f &= f(y_1, y_2, \dots, y_n) \\ \Delta f &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial y_i} \Delta y_i \right) \end{aligned}$$

因为只有系偶误差与偶然误差，故综合误差为

$$I^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial y_i} \Delta y_i \right)^2$$

如按各项误差等影响的原则来分配误差，则各项误差的允许值应为

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial f}{\partial y_i} \right| \Delta y_i &\leq \frac{I}{\sqrt{(1.1 \sim 1.2)n}} \\ \Delta y_i &\leq \frac{I}{\left| \frac{\partial f}{\partial y_i} \right| \sqrt{(1.1 \sim 1.2)n}} \end{aligned}$$

前面说过，当有的误差分量已知时，应先从总误差中减掉它们的影响，将剩余的部分再分配给其余的误差分量。设在 n 个误差分量中第 s 个误差分量是已知的，它小于总允许误差 I 的 $p\%$ ，即

$$\begin{aligned} \left| \frac{\partial f}{\partial y_s} \right| \Delta y_s &< (p\%) I \\ \Delta y_s &< \frac{I(p\%)}{\left| \frac{\partial f}{\partial y_s} \right|} \end{aligned}$$

剩余的误差允许值为 $(1 - 0.01p)I$ ，这时其余各误差分量的允许值，应将 $(1 - 0.01p)I$ 代替原来的 I 即可。

五、测量系统故障的排除方法

(一)概述

一般说来，除非具有丰富的设计经验和实际知识，新设计安装的系统往往有一些毛病或故障而不能完全正常地工作，这就需要调试。调试、调整或排除故障是任何系统设计的一个组成部分。

通常遇到的有元件故障、软件故障和干扰等问题，因此设计调试人员需要有一套方法来判断和排除它们。这涉及到各种有关知识、方法论和实际经验等许多问题，几乎每一部分都可成为一本专著。设计系统时，即使是极细心地设计和制造一系统，但在第一次加电时也很难立即正常工作。元件的故障、软件的错误、接线上的错误、未预料到的干扰或者设计未发现的问题都会使系统发生问题。发现问题并加以改正就是调试过程的任务和目的。调试过程也叫排除故障和除错的过程，是任何系统设计中的组成部分。系统设计者可以采用很多方法来识别和纠正错误。这里仅对一般性故障与调试方法作一粗浅的介绍。

(二)一般故障与调试

1. 简单故障

在检查一个系统时，第一件事就是检查电源情况。如果采用芯片插座的话，在开始检查电源时最好不要先插入重要的电路片子。可用电压表来检查电平、用示波器来检查波形。稳压器过载、电源线上的压降、或电源元件失效都会造成电平不正常。首先应该测出电压输出，插件插头、电路引线在内的各点电压。

各点电压都正常后，故障可能在电路方面或软件方面。电路方面的故障包括接线故障、元件故障以及内部或外部的噪声干扰。

接线故障就是导线的错接、短路或开路，可用检查两点之间的电阻值来识别。要检查每根导线，弄清楚它们是否都接到正确的电路引脚。在系统正常工作以前不要贸然肯定没有错误，至少要检查各引脚的引线两遍。如果故障的现象预示某些部分出错的可能性较大，可先检查该处的接线以加速除错的过程。接线故障是最普通而麻烦的问题，找出它们往往要花很多时间，但一旦找到后解决起来是比较容易的。为了测试方便，有时不用电压表而用峰

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障时间。

众所周知,元件绝大多数故障发生在“初期”或“后期”的情况,而在“中期”故障就较少。当然各种元件的初期或后期的长短是不同的。图1-2-27所示为元件的寿命曲线。

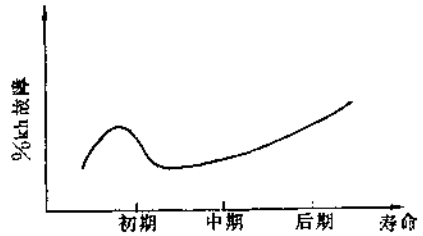
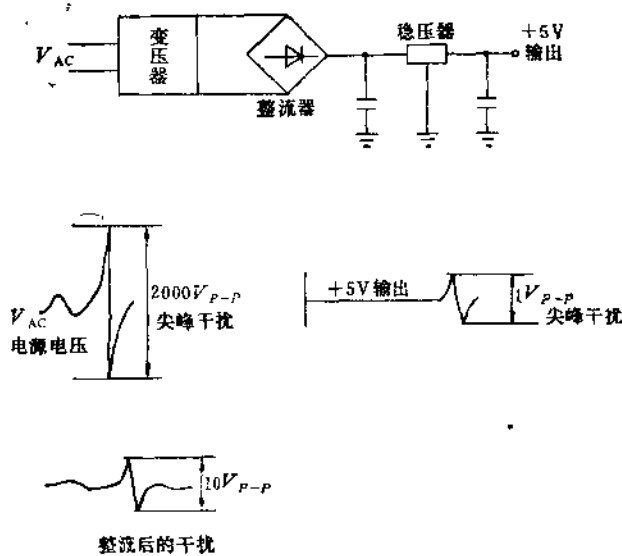


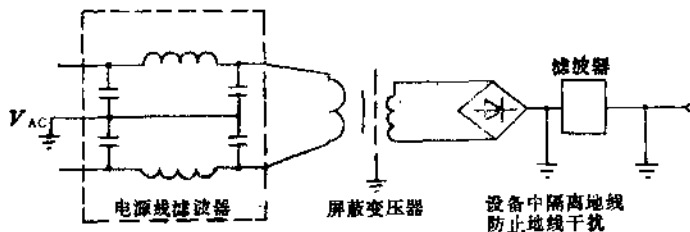
图1-2-27 %kh故障与寿命的关系

对于元件故障,可在静态下进行测试,也就是在系统停止工作时来检测元件是开路、短路或错误的逻辑功能。

噪声是到处都有的,只要有电流流过导线就有电磁场存在。因此,电源变压器、电机和电线产生的磁场到处都有,而且考虑到电视、无线电等各种发射设备,任何长度的导线都变为一个天线。噪声



a)



b)

图1-2-28 电源干扰与滤波

a) 电源线上的尖峰干扰 b) 电源线上的滤波

不仅来自外界,而且还可能来自系统的内部。下面举几个例子加以说明:

(1)当大量集成电路同时工作时,其总的电流变化可能使电源电压发生变化而影响线路的其余部分工作。通常在每个集成电路附近加有旁路电容器以避免这类噪声。

(2)如果两根导线靠得很近的话,则沿着其中一根传输脉冲时,则会由于感应效应在另一根导线中感应出来一个脉冲。这种感应脉冲可能会使触发器工作产生错误。为了防止这种作用通常采用双扭线或加入屏蔽的传输线。

(3)设计电源时考虑不周,产生50Hz的干扰信号。

(4)当接通某些设备,例如,电传打字机在打字时可能会产生尖峰干扰,这种尖峰干扰可能会使数据丢失或者发生故障。为此,利用简单的电源就无法解决。如图1-2-28a所示电源线上的尖峰干扰,图1-2-28b所示为解决这个问题在电源线上使用滤波器和屏蔽的变压器,以消除高频干扰脉冲。

2. 排除故障简便法

元件以一定的比例发生故障,在系统周围和内部又可能发生干扰,再加上软件也可能有问题或不可靠。如何以一种简便而有理的方式发现故障,是一个值得研究的问题。下面以常见的故障为例加以说明:

(1)导线短路、开路、电压不正常,这些是最常发生的问题,但很容易检查,一般利用万用表测电压、电阻、电流就行了。

(2)元件是否损坏,例如,电阻、电容、电感、二极管、晶体三极管等可用万用表、晶体管测试仪等设备检测,有时也可与好元件对比试验。

集成电路的特性没有复杂的设备是难以测试的。因此在调试时,应当备有各种元件的备件,这样可以用替换法来发现有故障的元件。一旦整个线路正常工作以后,应把所有备用片子都放入此系统中进行测试,以弄清楚在生产时是否会对元器件容差要求过高而发生问题。一般说来小规模集成电路是容易检查的,利用逻辑笔检查高电平、还是低电平很方便。

(3)间歇发生的故障,最多是由于接触不良或焊接有问题,因此在认为其它方面有故障之前首先要检查这些地方。为了迅速有效地排除间歇故障,需要使用示波器(最好有存贮功能的)或逻辑分析

仪。

(4)元件使用不正确,造成不可靠的工作,也是常有的事。每个元件都有其使用极限。例如,电阻中流过的电流过大就会使其烧坏,电容上加有 too 高的电压就会使其击穿而短路。在一输出线上带有太多负载时,可能会随温度的变化而间歇地使读写数据出错。因此,必须仔细弄清楚元件的规格和技术要求。

除了极限限制、静态特性之外,还有动态的规定。例如,把地址送入一个存储器后,必须稳定一段时间后才能发出数据和写入脉冲。在系统定时设计时,必须遵守这一规定。

(三)动态故障

在动态情况下,电压表、逻辑笔等由于无法指示时间而不能使用,故需要用其它设备来表明逻辑电平的定时是否正确。

1. 示波器

为了获得定时信息,最普通的是使用示波器。采用单踪或多踪示波器,可以准确地测出故障的幅度、宽度与时间的关系。

2. 逻辑分析仪

利用逻辑分析仪能够同时观察系统中多达32个节点,把这些位以二进制、八进制、十六进制来显示,或者以普通示波器的扫描踪迹来显示。它在指定的一种比特组合情况下或触发信号出现时开始显示,能存储每个时钟周期,并能显示触发信号之前或之后的若干组信号。在时间上合拍的每组信号叫做一个状态。

常用的逻辑分析仪有着重定时信息和着重状态信号。定时分析仪实际上是一种多通道示波器,当怀疑有逻辑尖峰干扰或逻辑电平方面的问题时用它很有用。状态分析仪用于检查复杂的软件、硬件故障时是非常有用的。

六、测量和社会、企业的关系

有关测量和社会、企业的关系问题,如图1-2-29所示。一般认为,生产过程中的测量,其目的在于通过科学方法,弄清产品的特性以保证产品的质量。然而,实际上由于存在非计量技术性的种种障碍而产生各种各样的问题。如按图1-2-30所示,许多人认为,这种障碍既限制了测量,又是无法解决的问题;另一方面,如图1-2-31所示,一些人认为与安全有关的测量,无论来自何方,都不允许限制。现实的问题是,由于企业的利益或设备等经济上的

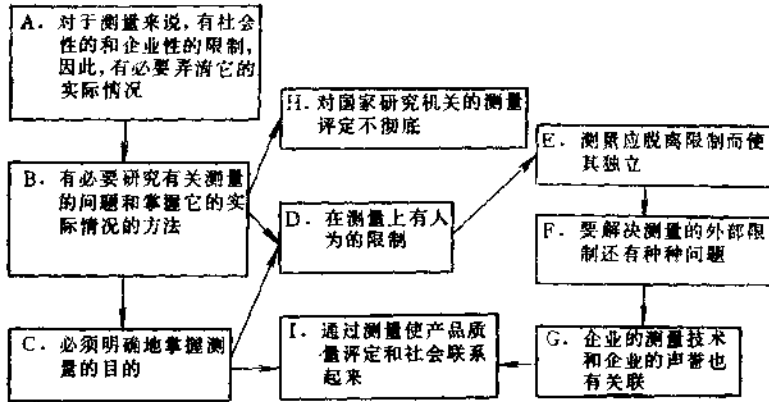


图1-2-29 测量和社会与企业的关系

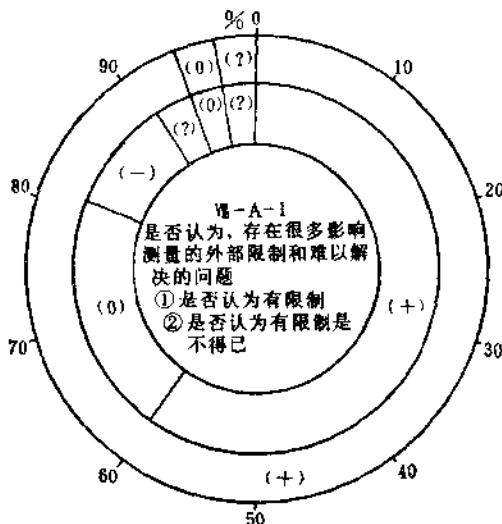


图1-2-30 影响测量的外部限制

原因,事实上与安全有关的测量受到了限制。

具体的情况如图1-2-32所示,对企业不利的数据不能提出,或者从一开始就使用不出废品的系统进行测量,以此来限制测量。防止出现这种情况的方法,如图1-2-33和1-2-34所示,大多数人认为测量人员及测量数据评定人员,不管来自何方都应使其独立,保证它们的地位,不受外部限制。但人们对外部限制问题的认识,还是不充分的。其他的方法有赖于国家规定和国家研究机关的协助。

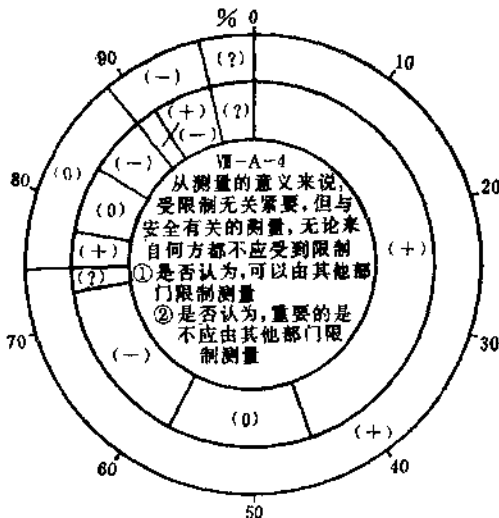


图1-2-31 与安全有关的测量不受限制

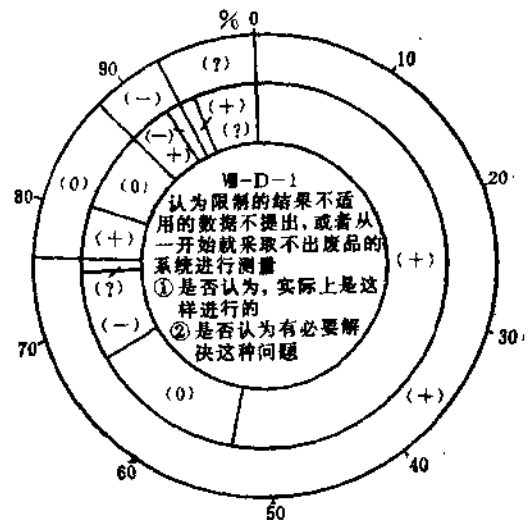
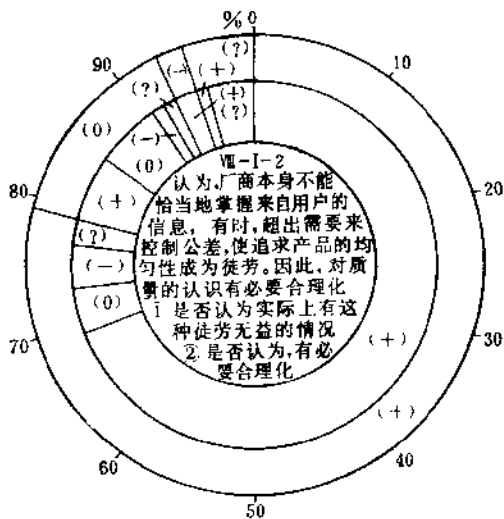
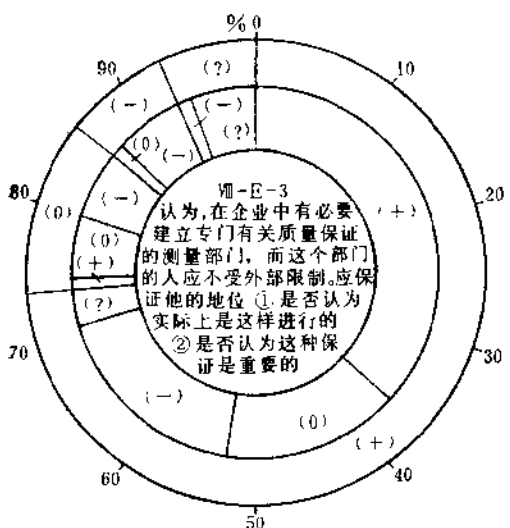
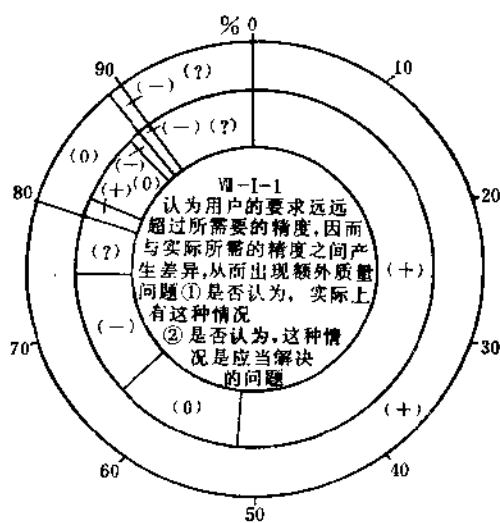
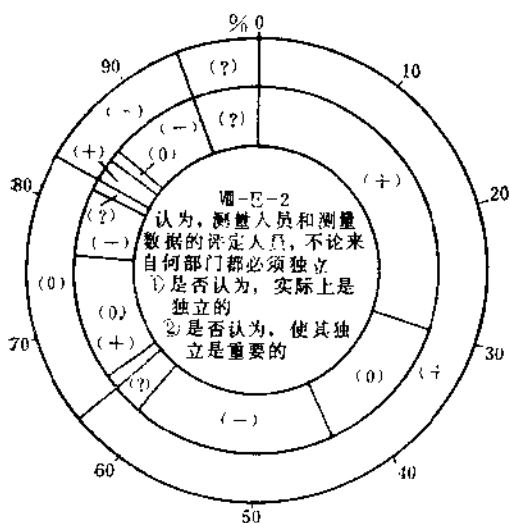


图1-2-32 检测与废品



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现了额外质量问题, 或者由于厂商本身没有准确地掌握来自用户的信息, 反而出现了严格控制公差的问题而造成。质量标准的确定, 的确由于种种复杂原因的存在, 很难简单地加以规定。任何一种测量精度都包含着许多影响因素。根据这些情况可以认为, 质量标准的制定, 厂商本身应当考虑产品的用途, 弄清机能和精度的关系之后, 根据其结果来设定公差, 目前似乎还没有这样做。

第四节 现代化实验室的建设与对外科技服务

实验室的现代化管理, 就是用科学的理论和方法, 在最短的时间内, 以最少的人力、物力和财力, 最有效地利用现有技术, 建设起高效能的现代化实验室, 充分发挥它们的效益。

现代化管理的主要手段有系统工程、控制论、信息论、数学模型、电子计算机、通讯技术等。下面分四方面来描述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、准确和有利的反馈。

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验技术和预测实验技术的发展方向等。

4. 实验室的评估

对实验室的基础条件、管理水平、实验效益等各方面情况进行有特色的评估。

(三)计算机管理具备的条件

1. 领导重视

建立计算机管理是一项复杂的工作,涉及到各个部门,因此要有一个重视管理、了解科技发展情况、积极支持现代化管理并能落实各项具体安排的

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,应安排好人机的衔接问题。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,这是总体程序设计的依据。仪器设备的管理系统主要有以下几方面功能。

(1)建立帐目的功能 经过核实整理的基本资料输入到计算机,在磁盘中长期保存,作为统计、查询、打印表格的依据。每台设备、仪器的基本资料,包括使用单位代号、分类编号、设备名称、型号规格、单价、产地、出厂号、附件等。

(2)更新帐目功能 例如,对设备、仪器的更

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，应用领域不同，所需传感器的种类及其应用目的也略有差异，但主要目的是为了**实现自动化、节省人力、提高效率、增强产品功能、确保安全、保护环境、节省能源和资源。**

表1-3-2为近代发展的**光纤传感器的工作机理**；表1-3-3为**光纤传感器的应用情况**；表1-3-4列出了现在正开发的**新型敏感元件**；表1-3-5列出了**半导体气体传感器的分类**；表1-3-6列出了**S型高灵敏度湿度计的分类**；表1-3-7列出了**热敏电阻器材料的分类**；表1-3-8列出了**各种霍尔元件的性能**；表1-3-9列出了**多功能陶瓷传感器的技术性能规范**；表1-3-10列出了**多功能传感器的典型特性**；表1-3-11列出了**压力传感器**；表1-3-12列出了**农用传感器的应用情况**。

表1-3-1 各领域对传感器的需求

领域	所需传感器的种类	应用目的
民用设备	温度、湿度、露点、光、磁性、气体、液位、流量、重量、压力、振动、污染、含氧量、红外线	方便、舒适，提高性能、安全、节能

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、液位、转矩、振动、气体、温度、露点、车速、方位、照度	方便、舒适，提高性能，控制废气排放，安全，节能（燃料消耗）
工业仪器仪表	温度、湿度、压力、流量、液位、浊度、pH值、成分、气体、重量、放射线、形状、位移、转速、振动、超声波、磁性	自动化、节省人力，生产工艺合理化，安全管理，防止公害，节能
防灾、防盗	气体、火焰、烟、温度、地震、漏水、非法闯入、红外线、振动、超声波	安全性，防止灾害，防盗、防窃
健康、医疗	温度、超声波、光、放射线、磁性、红外线、血压、血流、血栓检查、心电图、身长、体重	机电一体化，残废、老年化对策，远距离诊断，人工脏器
农林、水产	温度、湿度、气体、霜、日照、照度、pH值、成分、形状、重量、超声波、红外线	园艺设施，探测鱼群，保鲜
海洋、气象	温度、湿度、风向、风力、气压、雨量、盐分、潮位、波高、日照、浊度	自动检查，遥测
资源、能源	磁性、光、红外线、重力、超声波、地震波、放射线	探矿，局部能源利用

表1-3-2 光纤传感器的工作机理

传输信号类别	工作机理	检测电路	主要局限性	典型例子
1. 相位	信号和参考光纤之间(或不同传播模)的干涉。 迈克耳逊干涉仪 马赫曾德干涉仪 法布里珀罗干涉仪 萨格纳斯干涉仪	条纹计数或分数相位模测	激光噪声和稳定性 小相移测量排除不希望有的寄生效应(或其它物理量)的影响	光纤陀螺仪水听器 动态压力和应力测区的多模测量仪、光纤电流测量仪
2. 强度(振幅)	由于吸收、辐射和折射系数的变化对传输光的调制	模拟电路	对光源强度变化范围和连接损耗(长距离)的校正	用多模微弯曲损耗的应力/压力光编码

(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, 光高压计

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: 膨胀体变形及光闸机构 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闸机构 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
流 量	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 气液光吸收	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
湿 度	吸湿体伸缩与光闸机构 反射面结露引起的漫反射	接受光强度 接受光强度	

(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
磁场	磁旋光效应: 常磁性玻璃 定偏波光纤 磁双折射效应 磁应变膜光纤的磁应变双折射	偏振光转角/检测光强度 偏振光转角/检测光强度 偏振光转角/检测光强度	光纤/常磁性玻璃传感器 磁应变光纤磁传感器
电场	电场感应双折射 电场感应吸收端移动	偏振光转角/检测光强度 接受光强度变化	强感应体双折射电磁传感器 吸收型电场传感器
放射线	荧光体闪烁 放射线损伤的吸收	发光脉冲计数 接受光强度变化	荧光光纤 掺镭光纤
空间量 (距离、长度)	投射光线的反射角/反射位置的检测 投射光膜的遮断长度 光编码	接受光角度及位置 接受光宽度 编码光输出	光纤位移计 光测长器 光纤风向计
物体形态	光的遮断 规则排列光纤	两位(开/关)输出 成像输出或色分布	光限位开关 光计数器 成像光纤束

表1-3-4 现在开发中的敏感元件
(进展程度处于研究阶段的)

作的目的 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	长度	1	环境安全对象	1	光敏感元件	由光激励状态产生的电子移动反应	高分子电解质和光激励化学	光电流的增大
	位置	6	制造业用生产设备 工业用机器人 方向检查 纸张供给检测 位置确定和控制	6	距离敏感元件 半导体光敏感元件 容量型位移敏感元件 半导体磁敏感元件 感应型敏感元件 静电电容敏感元件	激光的检出 光电效应 LC振荡频率变化 霍耳效应 涡(电)流引起的振荡振幅的变化 电路变化	光电二极管 CaAs半导体 化合物半导体 铁氧体 电极	10ms以上的响应 没有稳定的器件制作方法 因振动和气氛而引起的误动作在-15~120°C下工作 检测距离应在40mm以内 称作敏感元件的要简化
械								

(续)

作的目的对象	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系电变材料	温度特性的改善	
		应变	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	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	检测极限要微小化	
	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	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 $400 \times 90.066 \text{ kPa}$ 40MPa静压力, $30 \sim 80^\circ\text{C}$ 温度下工作
械	流速	1	海流测定, 鱼群探测	1	非接触3维速度敏感元件	压电效应	PZT	空间分辨率要提高, 计算量增大
	流量	1	工业计测	1	流量敏感元件	光弹性效应	无机(半导体以外)	提高精度
	表面粗糙度	1	超精密加工控制	1	粗糙度敏感元件	CCD	玻璃纤维	纤维的正确排列
	形状	1	物体的认识	1	距离敏感元件	与电视摄像机相组合	摄像管	1s以内要测定25万个点
	其它	2	制造业用生产设备	2	感压导电性橡胶敏感元件 纺纱断头敏感元件	感压导电性橡胶的电阻变化 电光和光电转换	感压象电性橡胶 玻璃-光纤纤维	滞后现象 飞花对策
			机器人用触觉敏感元件 粗纱机, 精纱机, 其他					

(续)

作为目的检测对象	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
音响	2	塑料加工控制	1	压电型 AE 敏感元件	压电效应引起的电压变化	铅酸钼陶瓷	消除噪声, 提高灵敏度
		遥控	1	超声波敏感元件	压电效应引起的电压	钛酸铅 (Pb-TiO ₂) 薄膜	要提高灵敏度
频率	1	卫星通信, 海洋计测	1	高灵敏度电磁波敏感元件	约瑟夫逊效应引起的电阻变化	CaAs, InCa-As, InP, 半导体	复合功能化, IC 化
电	2	高精密度电气测定	1	约瑟夫逊器件敏感元件	磁电转换	Pb 合金, Ni 合金超导材料	要能经受住温度循环
		永久电流控制	1	超低温下的开关	电致转换	超导体	低接点电阻化
	1	VTR 等的磁头	1	半导体磁阻器件敏感元件	磁阻效应	InSb (铋化锡)	要能大量生产特性良好的产品
	1	产业用机械手	1	陶瓷叉敏度敏感元件	因电压效应引起的电阻变化	BaTiO ₃ 系氧化物半导体	感压精度高, 响应快
磁	1	带式记录器机构	1	磁阻器件	因磁场引起的阻值变化	磁阻器件	组装到线圈型磁头
	1	采用磁勘查的资源开发	1	SQUID	约瑟夫逊效应	Pb 系合金	热循环
	1	机械应力测定	1	磁-应变敏感元件	磁-应力转换	合金 (非晶质)	(老化) 时效
温度	8	科学计测 核聚变等离子体等的温度测定	8	分光器	利用多普勒效应获得等离子体速度温度	Fe	测定波长的极限, 分辨率
		低温下温度测定		PN 结电容体温度计	PN 结的电容和电感的温度变化	Si, Ge, 半导体	检测范围比较小
		超低温电子学		极低温温度敏感元件	温度引起的电容、电感的变化	Si, GaAs, CaSb	磁场不灵敏性
	1	温度的宽范围测定	1	红外线敏感元件	光-电转换	半导体	界面控制技术
	2	保健医疗 体温测定	2	热型红外线敏感元件	热阻效应	光刻胶膜	热阻体的材料选择 和形成法 消除温度以外的应变
		生体温度测定		光纤温度敏感元件	应变引起的纤维折射率变化	光纤	
		1		电离噪声环境下的温度测定	1	光吸收型温度敏感元件	吸收端的温度变化
	1	飞机用燃气涡轮发动机的温度测定	1	流体温度检测器	压电电效应 (气体压→电)	敏感元件主体为金属, 转换部不明	必须能经受住 800°C 左右的高温
光	1	科学研究计测	1	极超高速光敏感元件	光-电效应	化合物半导体	1ps(10 ⁻¹² s) 级的变化的检测
	1	微弱光图形测定	1	宽波长范围光敏感元件	光电效应	II-IV 族 III-V 或化合物半导体	要生成良好的异质结

(续)

作为目的的检测对象	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	
光	可见光	机器人	1	光敏感元件	光电效应	非晶半导体	高灵敏度, 高效率	
		卫星姿势检测	1	(启动敏感元件)	光电效应	Si半导体	应尽可能地检测出不亮的星	
	红外线	信息处理, 通信 图像处理 光通信, 图像传感器 通信, 信息处理 光通信, 光IC	4	红外敏感元件	光散射	液晶和Si半导体 (Al, Ga)Sb 光纤 III-V族混晶半导体	结构的简化 低噪声化 旋转角 0.01°/h 的检测 厚度, 杂质掺入量的控制	
				红外光敏感元件	光导电, 光电效应			
				光纤敏感元件	光弹性效应			
				光晶体管	光电晶体管			
图像传感器(计划)	1	高分子光敏感元件	光导电效应	对乙烯苯	输出电流的改善			
电能源 监控器 被覆电线不良点检测	2	等离子检测器 红外线敏感元件	高速热电子 因红外辐射产生的电阻变化等	铜 半导体或热电器件	低强度也要能感测 要消除背景辐射的影响			
红外线发光物体的检测	1	红外线敏感元件	光导电效应	Si, InSb, 其它	要在室温下使用			
放射线	X射	1	X射线摄影的电子化	1	半导体X射线敏感元件	X射线 → 光 → CCD	Si和化合物半导体	X射线光 → 转换效率要提高
	照射剂量	1	照射剂量的测定	1	半导体放射线敏感元件	光电效应, 康普顿效应	Si半导体	
	剂量率	1	发电厂的排气和排水检查	1	光半导体放射线敏感元件	康普顿效应, 光电效应	Si半导体	
湿度	湿度	科学计测(湿度测定)	1	湿度敏感元件		无机半导体, 尖晶石系	(灵敏度, 检测极限)	
		制造业用生产设备 各种工业中的水分控制 高纯气体的纯度监视 空调用	3	半导体湿度敏感元件	因水分的吸附, 吸收所引起的容量变化	Al ₂ O ₃	C值在使用范围内产生20%以上的变化	
			湿度敏感元件	电荷的分布变化	绝缘体	缺乏长期稳定性		
			湿度敏感元件	因吸湿引起的介电常数变化	氧化物半导体	在高温环境下使用, 要能经受长期使用并保持重复性		
	环境气象	1	湿度敏感元件	离子传导	高分子	环境适应性		
水分	1	电力能源	1	湿度敏感元件	(电化学反应)	(无机半导体以外)	(选择性)	
化学	纯度	1	能量(H ₂ , 气体浓度检测)	1	半导体可燃性气体检测敏感元件	气体浓度-传导电子密度变化	SuO ₂ , n型半导体	要在5年以上期间内不产生变化
	离子浓度	1	计测(浓度测定)	1	离子选择性电极	氧化状态的变化		

(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 ₂ O ₃	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 ₂ O ₃ 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 ₂ 膜	要防止劣化
学	气味	5 科学计测 环境、安全、 气象 气味检测 安全 HA用 家庭、食品、 保健、环境	1 3 1	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 气氛敏感元件	电生理反应 把氧化还原反 应作为电阻变化 来读出	生物 SnO ₂	使用时间可能很短 时效(老化)
				气味敏感元件	因吸附引起的 电阻电容变化	生物高分子	对腐蚀性气体的耐 久性
其它	5	SO ₂ 浓度测定 与烟检测-排 气器联动 控制汽车的空 气燃料比,其他 可燃性气体漏 泄检测器 食物中的味道 检测	1 1 1 1	固体电解质 SO ₂ 敏感元件	伽伐尼电池反 应	硫酸钠	控制伴随着相转移 产生的裂纹
				有机生烟敏感 元件		氨基甲酸乙酯 树脂与导电成分	因水蒸气和油雾引 起的误动作
				氧气敏感元件	伴随氧分压 产生的电动势	MFeO ₃ 类化 合物	使用中的结构变化
				气体敏感元件	因表面氧化还 原反应所引起的 导电变化	氧化物半导体 (SnO ₂)	特定气体的识别
生 体	1 3 3	信息处理 保健、医疗 生体磁诊断 生体信号计测 诊断 生体磁计测	1 3 3	生物敏感元件	复合反应	(有机、微生 物、组织)	特性变化
				SQUID	约瑟夫逊效应	超导体	磁场矢量磁场分布 的同时观测
				生体磁信号用 SQUID SQUID磁通 敏感元件	约瑟夫逊效应 约瑟夫逊效应	合金薄膜 Nb ₃ Ge等高临 界温度超导体	外周噪声的影响 消除法 作为磁通敏感元 件,工作温度范围宽

(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 因其池物质引起的 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 ₂ 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 _x CoO ₃ , r-Fe ₂ O 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,受环境温度的限制				
	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	10%~30%	±2%	使用校正表校正				
	LB	20%~40%						
	MB	40%~70%						
	HB	70%~90%						
	UHB	80%~99%						
AR-22YB AR-33YB AR-66YB	DRB	40%~90%	±3%	直读				
					DRLB	20%~90%	±3%	直读

(续)

表1-3-7 热敏电阻器材料的分类

大类	中类	小类	代表性举例
NTC	单晶态	钻石、锗、硅	钻石热敏电阻器
	多晶态	迁移性金属氧化物复合烧结体	锰、钴、镍、铜、铝氧化物烧结体, 锆、钇氧化物烧结体
		缺陷型金属氧化物烧结体	还原型二氧化钛
		单晶多晶 熔融固化型多晶 氧化物 碳化硅类	锗、硅 钨、钽、镍氧化物 碳化硅喷射薄膜

大类	中类	小类	代表性举例
NTC	玻璃质	硼氧化物类 铁氧化物类 锗以及其它氧化物类 硫属玻璃 石英类	砷、磷、钨氧化物 铁、钨、硅氧化物 锗、钠、钾氧化物 硒化砷、硒化铋
		多环芳香族化合物 聚酰胺树脂	异紫萘酮体 添加界面活化剂的聚酰胺树脂
	液体	电解质溶液 熔融态硫属玻璃	水玻璃溶液 砷、钨、钨类

(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) $B = 1 \text{ kG}^{①}$	输入电阻 r_1 (Ω)	输出电阻 r_2 (Ω)	灵敏度 K_H (mV/ (mA·kG ^①))	不平衡电压 V_0 (mV)	V_H 的温度系数 β (%/°C)	r_1 和 r_2 的温度系数 d (%/°C)
砷化镓	100	≥ 8.5	约9	约1.5	≥ 0.085	< 0.5	约-0.1	约0.2
	150	≥ 12	约2	约1.5	≥ 0.08	< 0.3	约-0.1	约0.2
	400	≥ 30	约1.4	约1.1	≥ 0.075	< 1	约-0.07	约0.2
磷砷化镓	100	≥ 13	约6.5	约2.4	≥ 0.13	< 0.15	约-0.06	约0.2
	100	≥ 14.5	约5	约3	≥ 0.145	< 0.1	约-0.04	约0.2
	200	≥ 29.5	约5	约3	≥ 0.146	< 0.2	约-0.04	约0.2
镓	20	≥ 6	40	30	≥ 0.25	0.5, 1.5, 3.0, 10.0	0.02	0.5
	15	≥ 43	300	200	≥ 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 (Ω)	9×10^7	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

(续)

湿度-气体传感器		温度-湿度传感器	
响应时间 (s)		C-40°C/C150°C	11.0
吸附 (1%~50%相对湿度)	<10	湿 度	
解吸 (94%~50%相对湿度)	<10	R1%相对湿度 (Ω)	4 × 10 ⁸
气体特性		R1%/R20%	55
工作温度 (°C)	400~450	R1%/R40%	290
灵 敏 度		R1%/R60%	1000
R400°C (Ω)	6 × 10 ⁴	R1%/R80%	3200
R 气体 / R 空气		误 差	
乙醇: 100ppm	8~10	温 度 (°C)	± 2
烟气: 20%	4~7	湿 度 (%相对湿度)	± 3
响应时间 (s)		响应时间 (s)	
乙醇0~100ppm	<10	温 度 (20~90°C)	<10
		湿度10%~50%相对湿度	<10
		94%~50%相对湿度	<10
加热清洗 ¹		加热清洗	
电源 (W)	≤3	电源 (W)	<10
热时间常数 (s)	≤20	热时间常数 (s)	≤60

表1-3-10 多功能传感器的典型特性

湿敏与气敏传感器 (Huceram-III型)		热敏与湿敏传感器 (Huceram-V型)	
传感器体积	4mm × 4mm × 0.25mm	传感器体积	4mm × 4mm × 0.25mm
湿敏特性		传感器特性	
温度范围	1~150°C	湿度范围	1%~100%相对湿度
湿度范围	1%~100%相对湿度	温度范围	-40~150°C
灵 敏 度		湿度精度	± 3%相对湿度
R (1%相对湿度)	9 × 10 ⁷ Ω	温度精度	± 2°C
R (1%)/R(20%)	50	湿敏特性-灵敏度	
R (1%)/R(40%)	500	R (1%相对湿度)	4 × 10 ⁸ Ω
R (1%)/R(60%)	1500	R (1%)/R(20%)	55
R (1%)/R(80%)	4300	R (1%)/R(40%)	290
响应时间:	(s)	R (1%)/R(60%)	1000
94%~50%相对湿度	<10s	R (1%)/R(80%)	3200
1%~50%相对湿度	<10s	响应时间	s
工作电压	<5 V	90%~50%相对湿度	<10s
气敏特性		10%~50%相对湿度	<10s
温度范围	200~300°C	热敏特性	
灵 敏 度		灵 敏 度	
R (400°C)	6 × 10 ⁴ Ω	温度 C (-40°C)	1650pF
R (气体)/R(空气)	8~11	C (-40°C)/C(0°C)	2.0
(乙醇100ppm)		C (-40°C)/C(40°C)	4.7
R (气体)/R(空气)	4~7	C (-40°C)/C(80°C)	7.3
(烟气20%)		C (-40°C)/C(120°C)	9.4
响应时间:	(s)	C (-40°C)/C(150°C)	11.0
(0~100ppm 乙醇)	<10s	响应时间	s
加热清洗		20~90°C	<10s

表1-3-11 压力传感器

	压力范围 (1bf/in ²) ^②	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 ^①	-55~125	0.25% 10 ⁴ 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 ⁷ 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 ⁶ 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 ⁸ 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/in² = 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。

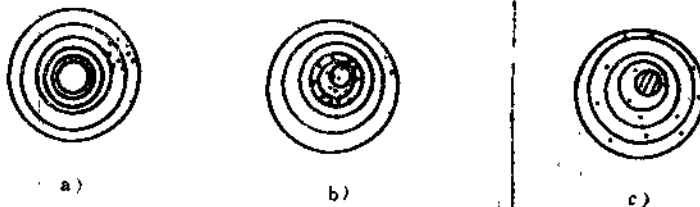


图 1-3-1

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 Δx 时,则输出量 y 的相应变化量为 Δy ,则传感器的灵敏度为

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

或 $S = \frac{dy}{dx}$ (1-3-1)

对于线性传感器及测试系统,其理想的静特性曲线为一直线,如图1-3-2所示。

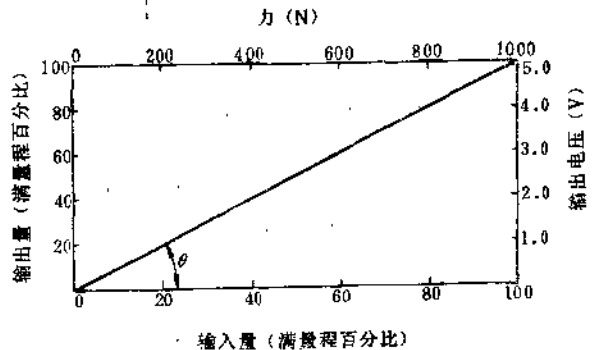


图1-3-2 理想线性系统的静特性曲线

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 $\operatorname{tg}\theta$, 也就是特性曲线的比例常数, 即

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

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°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 Δx 就等于电位器的导线直径。电位器的导线越细, 其分辨力 Δx 的数值越小。一般传感器在全量程范围内, 各处的分辨力 Δx 是不相同的, 用全量程中最大的 Δx_{\max} 除以满量程值 x_{\max} , 以所得的百分数作为分辨力的技术指标称为分辨率, 即

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

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

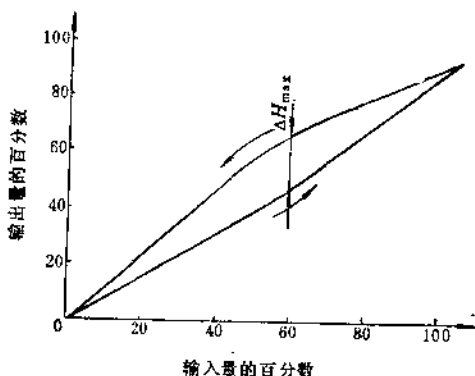


图1-3-3 迟滞误差

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

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

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 Δ_{\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。

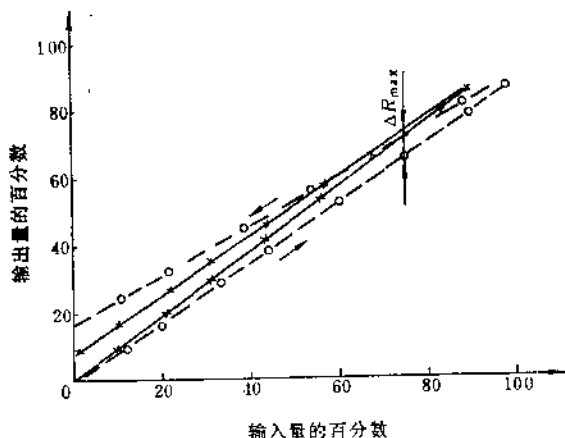


图1-3-4 重复性

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

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

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, 所以采用均方根 σ_r 来代替 ΔR_{\max} 较合适。此时, 计算重复误差指标时则有

$$R_N = \frac{\sigma_r}{Y_m} \times 100\% \quad (1-3-7)$$

有时也用 $2\sigma_r$ 或 $3\sigma_r$ 来求均方根重复误差, 即 $R_N =$

$$\frac{2\sigma_r}{Y_m} \times 100\%, \text{ 或 } R_N = \frac{3\sigma_r}{Y_m} \times 100\%$$

7. 线性度

对于线性仪表、传感器、测试系统等, 其输出与输入的关系, 在理论上是线性关系。实际上由于

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 ΔL_{\max} 与满量程输出值 Y_m 之比的百分数作为线性度, 即

$$L_N = \frac{\Delta L_{\max}}{Y_m} \times 100\% \quad (1-3-8)$$

这种线性度常称之为绝对线性度或理论斜率线性度, 该线性度是对理论直线而言的。这种理论直线只根据理论要求而画出, 与任何测试无关。

在许多情况下, 经常采用线性回归法衡量线性度, 此直线的线性度称为独立线性度。

例如, 一组已知数据, 输入端的输入值 X_i , 输出值为 Y_i , 其数据见表1-3-13, 求其线性度, 其计算公式如下:

表1-3-13 X_i 、 Y_i 数据表

i	1	2	3	4	5	6	7
X_i	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
Y_i	21.1	37.5	53.8	70.6	86.6	103.6	118.7

$$\text{相关系数 } r = \frac{\sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum(X_i - \bar{X})^2 \sum(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1-3-9)$$

式中 \bar{X} ——输入量算术平均值;

\bar{Y} ——输出量算术平均值;

r ——相关系数;

X_i, Y_i ——输入与输出值。

将表1-3-13数据代入公式(1-3-9), 经过计算求出相关系数为

$r = 0.99 \approx 1$, 相关系数 $r > 0.9$ 时为线性。因此 X_i 与 Y_i 为线性方程, 写出直线方程式:

$$\hat{y} = a + bx \quad (1-3-10)$$

利用最小二乘法确定 a 、 b , 将表中数据代入下式中确定 b 和 a , 即

$$b = \frac{\sum X_i Y_i - \frac{1}{N} (\sum X_i)(\sum Y_i)}{\sum X_i^2 - \frac{1}{N} (\sum X_i)^2} \quad (1-3-11)$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (\text{利用回归方程求 } \bar{x}、\bar{y} \text{ 值})$$

$$\sum x_i = 2.8; \quad \sum y_i = 492$$

$$\sum x_i^2 = 1.4; \quad \frac{1}{N} (\sum x_i)^2 = 1.12$$

$$\sum x_i y_i = 242.5; \quad \frac{1}{N} \sum x_i \sum y_i = 196.8$$

将上述数据代入式(1-3-11), 求出:

$$\left\{ \begin{aligned} b &= \frac{\sum x_i y_i - \frac{1}{N} (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sum x_i^2 - \frac{1}{N} (\sum x_i)^2} = 163.4 \\ a &= \bar{y} - b\bar{x} \end{aligned} \right.$$

$$\text{故 } \hat{y} = 4.9 + 163.4x \quad (1-3-12)$$

标准残差:

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - q}} \quad (1-3-13)$$

y_i, \hat{y}_i 的数据见表1-3-14。

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

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

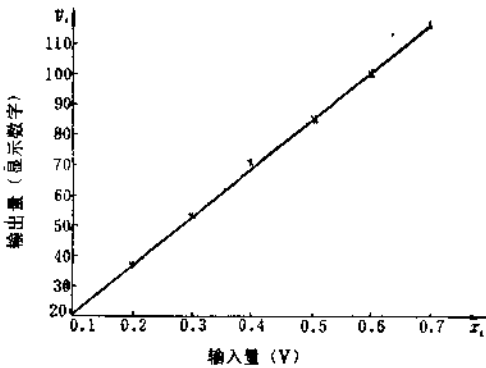


图1-3-5 线性度

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

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 ΔY_{max} 除以满量程输出的百分数便是符合度的技术指标。

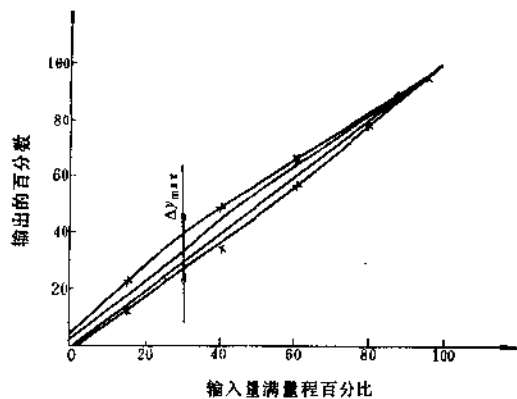


图1-3-6 理论曲线的符合度

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	$T \frac{d^2 x_1}{dt^2} + x_2 = Kx_1$	$x_2 = K \left(\tau \frac{dx_1}{dt} + x_1 \right)$
算子形式的微分方程	—	$(TP+1)x_2 = Kx_1$	$x_2 = K(\tau P+1)x_1$
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
$\frac{d^2 x_2}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dx_2}{dt} + \omega_n^2 x_2 = Kx_1$	$x_2 = K \left(\tau^2 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + 2\zeta\tau \frac{dx_1}{dt} + x_1 \right)$	$\frac{dx_2}{dt} = Kx_1$	$x_2 = K \frac{dx_1}{dt}$
$(P^2 + 2\zeta\omega_n P + \omega_n^2)x_2 = Kx_1$	$x_2 = K(\tau^2 P^2 + 2\zeta\tau P + 1)x_1$	$Px_2 = Kx_1$	$x_2 = KPx_1$
$W(s) = \frac{K}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$	$W(s) = K(\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1)$	$W(s) = \frac{K}{s}$	$W(s) = Ks$
$W(j\omega) = \frac{K}{\omega_n^2 - \omega^2 + j(2\zeta\omega_n\omega)}$	$W(j\omega) = K(1 - \tau^2\omega^2 + 2j\zeta\tau\omega)$	$W(j\omega) = \frac{K}{j\omega}$	$W(j\omega) = Kj\omega$
$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega\omega_n)^2}}$	$A(\omega) = K\sqrt{(1 - \tau^2\omega^2)^2 + (2\zeta\tau\omega)^2}$	$A(\omega) = \frac{K}{\omega}$	$A(\omega) = K\omega$
$\varphi(\omega) = -\text{tg}^{-1} \frac{2\zeta\omega\omega_n}{\omega_n^2 - \omega^2}$	$\varphi(\omega) = \text{tg}^{-1} \frac{2\zeta\tau\omega}{1 - \tau^2\omega^2}$	$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}$	$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2}$

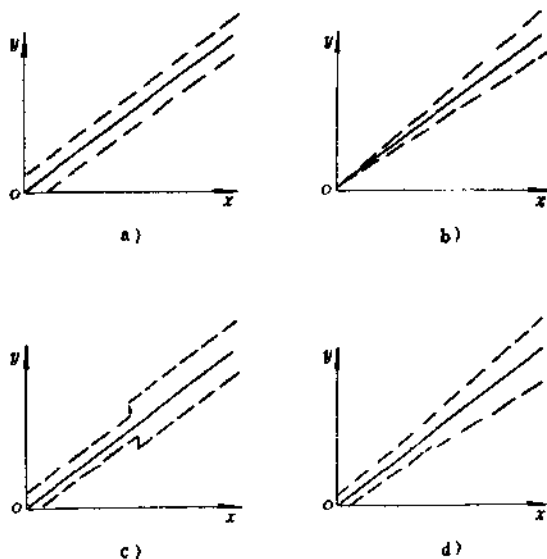


图1-3-7 几种误差带

- 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

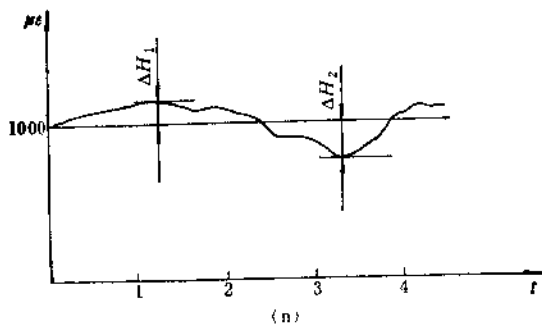


图1-3-8 稳定性

偏差。其数学表达式为

绝对偏差：最小 μs 发生在1.5h为 ΔH_2 ；

绝对偏差：最大 μs 发生在3.5h为 ΔH_1 。

$$\text{正向相对偏差} = \frac{\Delta H_1}{Y_{\max}} \times 100\% \quad (1-3-15)$$

$$\text{负向相对偏差} = \frac{\Delta H_2}{Y_{\max}} \times 100\%$$

稳定试验的时间视不同的使用要求而定，从几个小时，几个月到几年。

11. 零漂

零漂表示传感器在零输入的状态下，输出值的漂移，一般有两种漂移。

(1) 时间零漂

时间漂移一般是指在规定的时间内，在室温不

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°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。

在考虑测量快速变化量时，只考虑静态性能指标不行，必须考虑它的动特性指标。例如，某传感

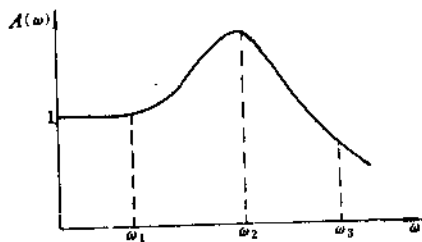


图1-3-9 幅频特性曲线

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 ω_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 ω_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 ω_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 $t_{0.5}$ 。

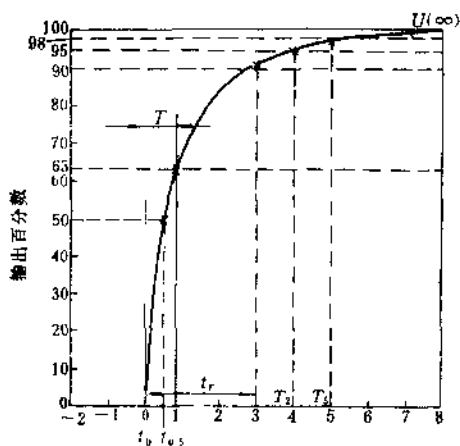


图1-3-10 一阶系统阶跃过渡过程的几个特征时间

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

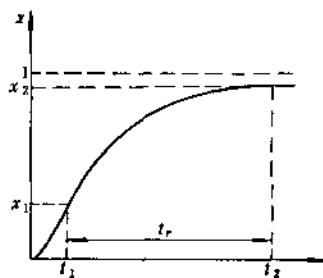


图1-3-11 上升时间

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

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

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

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_3 、 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

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{5} T_3 = \frac{1}{4} T_2 = \frac{t_r}{2.25} \\ &= \frac{1}{0.7} t_{0.5} \end{aligned} \quad (1-3-17)$$

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持在其的线性范围内进行。因而在许多仪器仪表与

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。

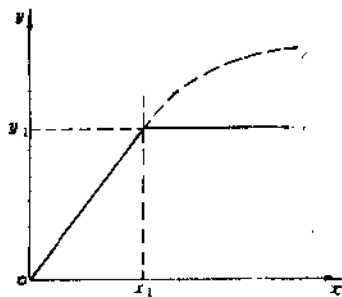


图 1-3-12 饱和特性

(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_3 或 T_2 都和前面的定义相同。上升时间 t_r 的定义较多, 从稳态值 10% 上升到 90%, 从稳态值 5% 上升到 95%, 从 0 上升到 100% 所需的时间都叫上

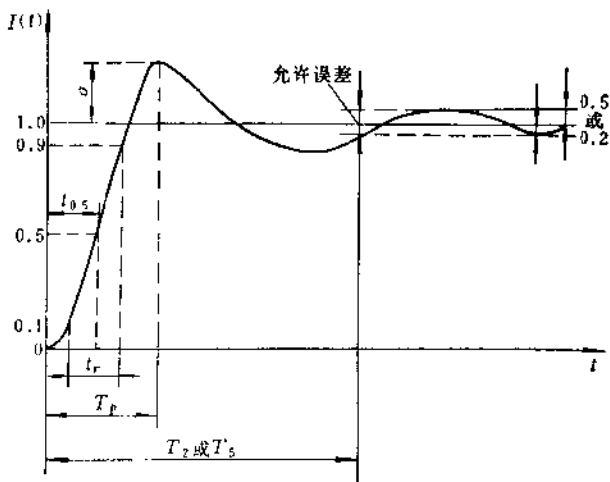


图 1-3-13 二阶系统的各种时域性能指标

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 $f_a = 1/T$ 的,如图1-3-14所示。

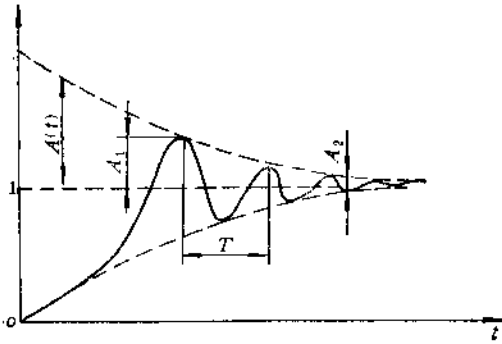


图1-3-14 衰减振荡过渡过程曲线的特征值

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 σ 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 σ ,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, σ 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 ω_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, β 如图1-3-15所示。

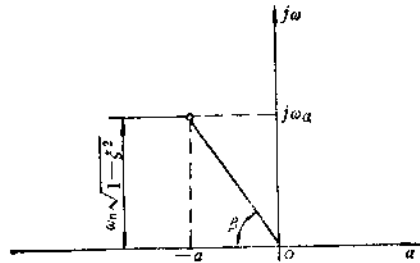


图1-3-15 在复平面上 β 的意义

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

由 t_p 可推算出 ω_d ,由 ω_d 与 t_1 可算出 β 值,由 β 值可算出 ξ 。由 ξ 、 ω_d 可算出 ω_n ,其值为

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

求出 ξ 、 ω_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

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

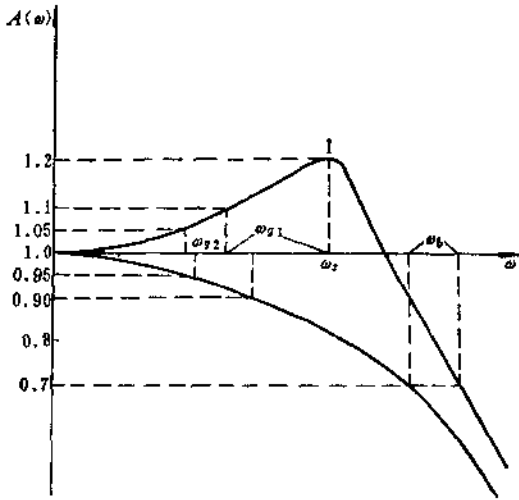


图1-3-16 频域的各种特征值

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。

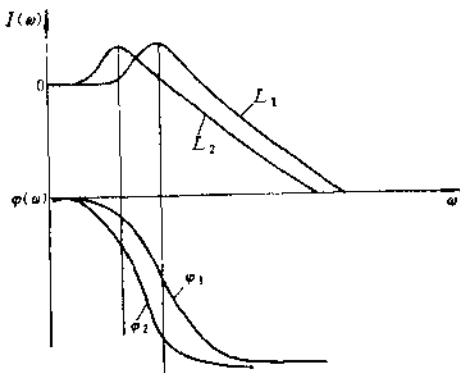


图1-3-17 两个系统的频率特性

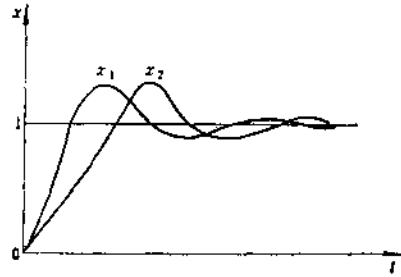


图1-3-18 两个系统的阶跃响应

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

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

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

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 ΔA 的 ω_g 与 φ_g

η	0.99	0.98	0.97	0.95	0.9	0.707
ΔA	0.01	0.02	0.03	0.05	0.1	0.293
ω_g/ω_b	0.1425	0.203	0.251	0.329	0.485	1
$\varphi(\omega_g)$	$-8^\circ 6.6'$	$-11^\circ 28.5'$	$-14^\circ 5.4'$	$-18^\circ 13'$	$-25^\circ 50'$	-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 ΔA 为其它值时的 ω_g 与 φ_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 σ 、 T_2 或 T_s 换算成频域的指标 ω_{g1} 与 ω_{g2} 、 ω_g 、 ω_b 、 $\varphi(\omega_{g1})$ 、 $\varphi(\omega_{g2})$ 等可用下面的方法。

超调量 σ 与阻尼比 ξ 有一单一关系,即

$$\sigma = \exp\left[-\sqrt{\frac{\xi}{1-\xi^2}} \pi\right] \quad (1-3-35)$$

如图1-3-19所示。当 $0 < \xi < 0.9$ 时,响应时间 T_2 或 T_s 为

$$T_2 = \frac{4}{\xi \omega_n}, \quad \omega_n = \frac{4}{T_2 \xi} \quad (1-3-36)$$

$$T_s = \frac{3}{\xi \omega_n}, \quad \omega_n = \frac{3}{T_s \xi}$$

工作频带 ω_g 与固有频率 ω_n 之比和 ξ 的关系为

$$\frac{\omega_g}{\omega_n} = \left[1 - 2\xi^2 \pm \sqrt{(1 - 2\xi^2)^2 - c}\right]^{\frac{1}{2}} \quad (1-3-37)$$

式中, $c = 1 - [1/(1 + \Delta A)^2]$, 由这关系可算出 c 与 ΔA 的对应关系,如表1-3-17所示。由式(1-3-37)

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

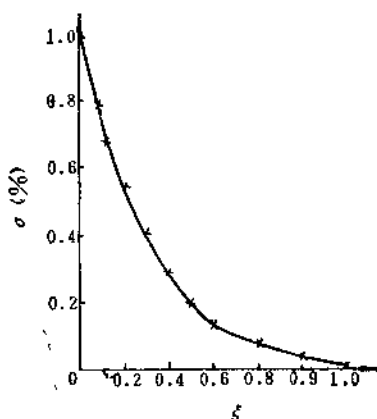


图1-3-19 超调量与阻尼比关系

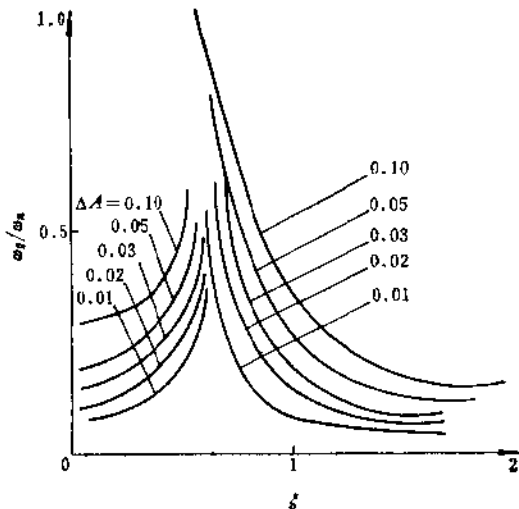


图1-3-20 典型二阶系统工作频带与阻尼比的关系

表1-3-17 各种幅值误差 ΔA 对应的 Δc 值

ΔA	0.1	0.05	0.03	0.02	0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.05	-0.1
Δc	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 ξ 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 ξ_1 , 不适用于其余各处, 与 ξ_1 相对应的 ω_g/ω_n 为

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

对应于各种 ΔA 的各条曲线的分段点上的 ξ_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 ΔA 所对应的几个特征量

ΔA	0.1	0.05	0.03	0.02	0.01
c	0.173	0.093	0.0574	0.0388	0.0197
ξ_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
ξ_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 ξ 比 ξ_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 ω_b 与固有频率 ω_n 之比与阻尼比 ξ 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 ω_g/ω_n 的关系为

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

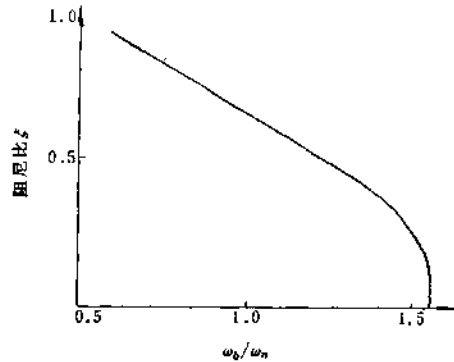


图1-3-21 典型二阶系统阻尼比与通频带和固有频率之比的关系曲线

(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 σ 查出阻尼比 ξ ;
- 2) 用 T_z 和 T_s 从式(1-3-36)便可算出 ω_n ;
- 3) 由 ξ 从图1-3-20查出 ω_g/ω_n 便可算出 ω_g ;
- 4) 由 ξ 从图1-3-21查出 ω_b/ω_n , 便可算出 ω_b ;
- 5) 将 ω_g 与 ω_n 代入式(1-3-41)便可算出 $\varphi(\omega_g)$ 。

下面介绍由频域指标 ω_{g1} 与 ω_{g2} 换算时域指标 σ 与 T_z 或 T_s 的方法。

将 c_1 对应于 ω_{g1} 与 c_2 对应于 ω_{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

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

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

$$\text{式中 } E = \frac{\omega_{g2}}{\omega_{K1}}.$$

有了上述关系式可以计算出频域和时域各性能指标的对换。其步骤如下:

1) 将 ω_{g1} 与 ω_{g2} 代入式(1-3-42)中算出 ω_n ;

2) 代入式(1-3-43)算出 ξ ;

3) 在有超调情况下, 将 ξ 代入式(1-3-35)或由图1-3-19便可求出 σ ; 无超调时按4) 计算响应时间。

4) 将 ξ 、 ω_n 代入式(1-3-36)算出响应时间 T_2 、 T_s 。

有的系统对幅频与相频都有要求, 其动态性能指标便需提出在工作频带 ω_g 内, 幅值误差 ΔA 与相位误差 φ_g 各小于某值。这种动态性能指标的换算方法请参考有关文献。

三、传感器对使用条件的要求

1. 电源要求

有源的传感器对电源往往有一定的要求, 例如恒流源、恒压源、频率恒定电源等。

2. 对环境的要求

外界环境的变化总是要对传感器的测量精度有一定的影响。主要表现在两个方面: 首先是由于环境的变化而产生对信号的干扰; 其次是外界环境条件的改变影响到传感器的特性, 如改变了传感器的灵敏度、线性度、迟滞等技术指标, 常见的影响是温度、振动、加速度和噪声。其中温度影响最为广泛, 如前面讲的传感器的零点温度漂移和灵敏度温度漂移, 就是传感器受温度变化的影响, 有的传感器还对加速度特别敏感。

3. 安装的要求

被测量在安装传感器后往往在某种程度上会产生变化。例如, 管道上安装流量计会增大流动的阻力, 安装上温度传感器会使温度场发生变化, 在质量小的机械构件上安装上加速度计会影响构件的振型和振动频率等。又如在气流中测压, 顺着气流方向安装与逆着气流方向安装, 测量的结果也是不相同的。在气流测压时还要考虑测温问题, 由于温度不同, 压力也发生变化。诸如此类问题甚多, 因此要特别注意传感器的安装问题。

四、传感器与实验室仪器的接口

前面已经分析了传感器的类型及特性, 对于不同的物理量一旦选定了一种特定形式的传感器, 就必须考虑适当的接口电路与测试仪器匹配。接口电

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。

(一) 传感器特性和信号用途

1) 对传感器精度和稳定度的要求 传感器的灵敏度是多少, 一个优秀的设计只要经济上允许, 需要尽量提高灵敏度及尽量减少其衰减。为了获得高的灵敏度可能要牺牲线性度、动态范围以及其它一些特性, 如果能抑制噪声和漂移, 能保持最高的灵敏度这是很需要的。

2) 传感器的输出能力和输出阻抗 对于选用不同类型的传感器其输出能力和输出阻抗是不相同的, 例如低电平的传感器——热电偶需要好的低噪声低漂移的放大器才能可靠地分辨微小的温度变化值; 又如压电晶体传感器则需要特别注意接线电容和放大器的输入阻抗。

3) 传感器的误差来源 除了噪声和直线性等明显的因素外, 还有许多其它因素都需仔细研究。

4) 对输出信号的要求 输出信号是单端还是差分是否有选择余地, 共模电平是多少? 共模误差来源是什么? 为消除对地噪声和干扰采用什么样的放大器等这些都要考虑。

5) 噪声和干扰源 首先要明确传感器输出信号的最快变化频率是多少? 要适当设计滤波器电路的幅度和相位误差与噪声和干扰之间的匹配。

6) 放大器 对于放大器的时间稳定性, 工作温度范围以及输出接口的可靠性, 传感器的非线性是在放大器中实现, 还是在传感器中实现等这些都要考虑。

7) 传感器是否需要外加激励电源 对外加激励电源的要求、稳定性以及功率、经济性问题应仔细考虑。

(二) 放大与线性化

这些处理可以在传感器附近, 或在远处的数据采集子系统中, 或者逐段地在几个地方进行。普通的信号接口电路就是将信号放大到数据采集系统的标准信号范围(即 $0 \sim \pm 10V$), 另一种即是把信号转换为过程控制系统用的标准电流范围(即 $4 \sim 20mA$), 以便把信号传送到远距离的目的。

对于电的隔离、阻抗变换、电平转换、放大与线性化将在下面详细介绍。

五、设计接口的基本问题

当考虑接口问题时, 首先要明确能精确反映被测量的传感器有多少类型以及如何根据被测值选择

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与经济问题。由于传感器输出多是小信号，故首先考虑产生干扰的原因及采取消除的措施。

(一) 干扰问题

众所周知，凡是传感器接口就有处理小信号的能力。但是真正想要解决特有的小信号问题或者精确处理宽动态范围的信号问题，则必须注意在专门

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、电路和系统应用之前，有必要讨论以下几个问题，即局部产生的干扰、地线回路的干扰、电源频率波动的干扰。

1. 局部产生的干扰

在低电平测量中，对于信号路径中所用的材料必须特别注意，如图1-3-22所示。

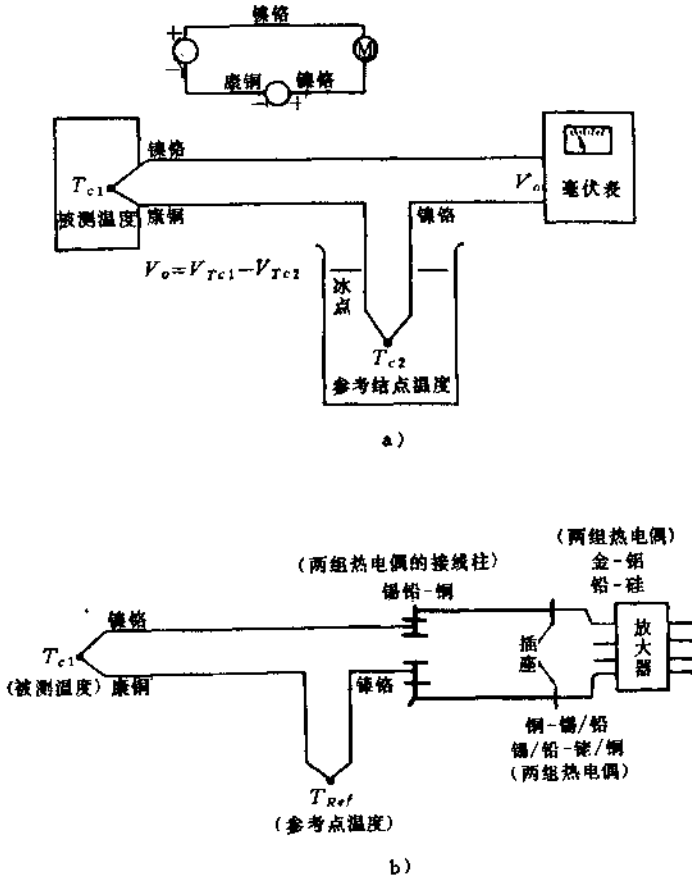


图1-3-22 热电偶的基本电路

a) 参考点使用冰浴的简单温度测量电路 b) 串联许多热电偶的测量电路

图1-3-22a 表示用热电偶进行测量的电路，采用冰浴将参考点温度维持在 0°C，图 1-3-22b 表示电路中串联有许多个热电偶的情况，由于热电偶是低电平元件，所以后接的信号处理是很重要的。要分辨 1°C 以下的温度，则必须处理毫伏级的信号，就需要采用相当贵的低漂移电子线路。在图1-3-22b 所示电路中焊锡、导线以及接线柱等都可能构成热电偶而产生实际的热电势。由于它们经常是成双出现的，为要使这些成双的热电偶保持相同的温

度，一般常用热屏蔽、散热器、沿等温线排列或者将大功率电路和小功率的电路分开等方法，其目的是使热梯度减到最小。采用两个不同厂家生产的标准导线，其接点都可能产生 200mV/°C 的温度漂移，为此要特别注意电路的连接点。

虽然采用插座能使更换电气元件或组件方便些，但缺点是可能产生接触电阻、热电势或两者兼而有之。如果多次使用，还会成为故障源。由于质量好的机械开关价钱相当昂贵，因而在设计电路

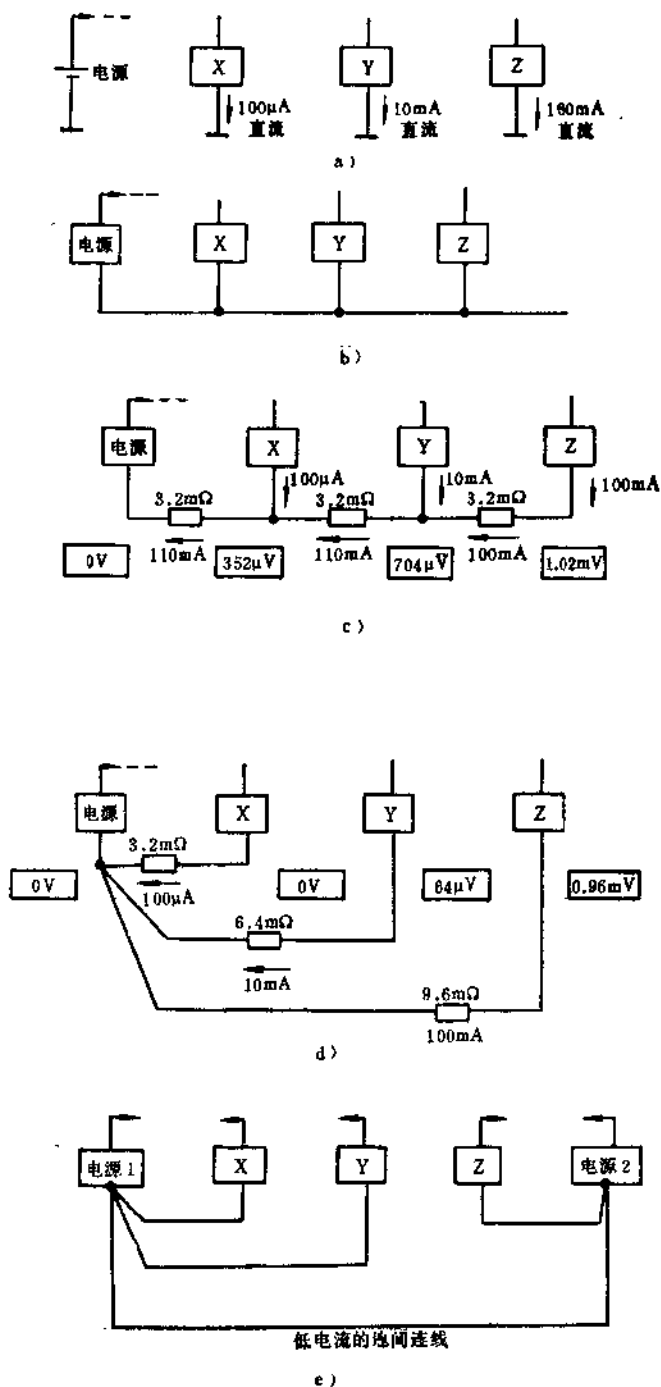


图1-3-23 接地举例

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 $3.2\text{m}\Omega$ 。电路Z的低端大约是 1mV ,小功率电路X的低端是 $352\mu\text{V}$ 。假如X是一个运算放大器,它的正输入端接到本身的地点,则相加点对以供电电源为参考点的信号源偏置 $352\mu\text{V}$ 。当选用更细的导线时,其电压降则更大些。

改善这种情况的一种方法如图1-3-23d所示,从每部分电路到供电电源的低端分开导线走线。电路X的偏置就可以忽略不计,电路Y的偏置减少了90%多,但Z的偏置仍然是 1mV 左右。为了改善电路Z的偏置,信号的返回线用更粗的导线,或者将Z的电源和别的电源分开,如图1-3-23e所示。

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。

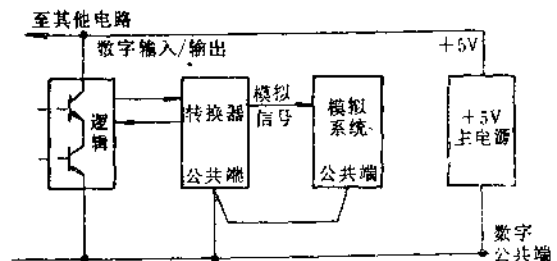


图1-3-24 便模拟和数字地线间的阻抗最小的接法

在某种情况下,接地的问题可以用仪器放大器在关键性的地方作为缓冲器来解决,将地电压转换为共模电压,而共模电压则由图1-3-25的放大器的差分输入端来抑制。如果非常高电平的电路和非常低电平的电路必须连在一起,则需要浮离电路,经过光隔离器传送数字信号,通过隔离变压器传输模拟信息。

除了直流和低频的地线问题而外,还有快速变

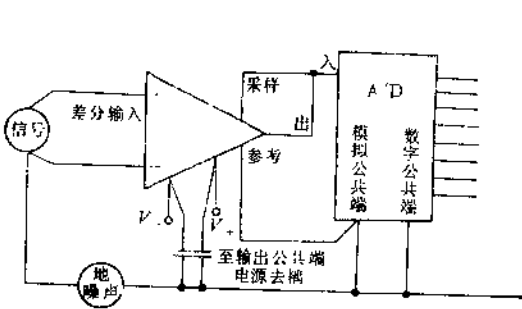


图1-3-25 利用仪器放大器作为分开接地系统的接口

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。这样的信号的另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。

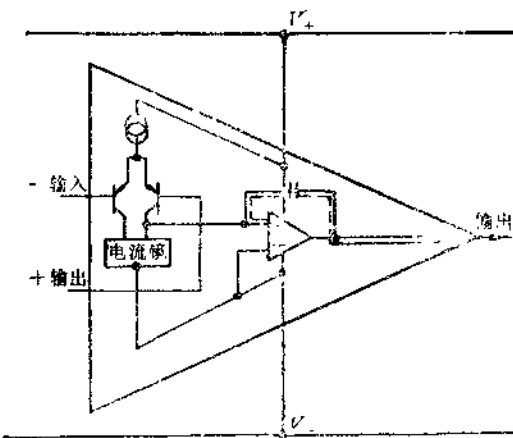


图1-3-26 典型的运算放大器电路结构积分器的参考点是 V_-

为了防止对模拟信号的高频干扰，必须适当地加入旁路电容器，此旁路电容加在放大器的电源端子至低阻抗的公共点。

图1-3-27说明这种方法，常用于模拟输出运算放大器对D/A转换器数字驱动噪声的去耦。如果旁路电容随意地画在直接接到电源的两根母线之间，而实际上按此接地，旁路电容起不到应有的作用，甚至还可能有害，它从“不干净”的地到“清洁”的 V_+ ，为噪声提供了低阻抗的交流通路。

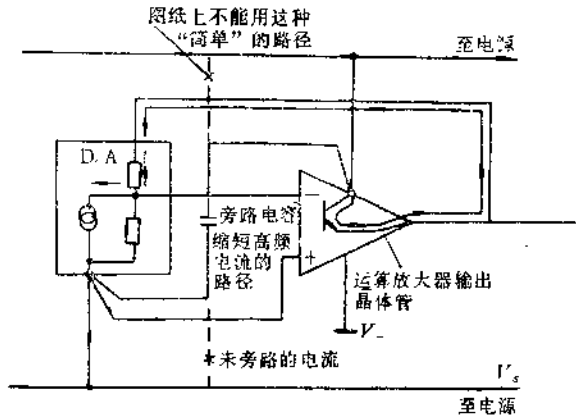


图1-3-27 应用虚地时电源的旁路（箭头表示未旁路的电流）

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小到最小、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。放大器由电池供电时，即使几微法的电容就可能严重地降低放大器性能。

通常做个小屏蔽盒包围放大器或一个部件以防止系统本身的电磁场或能量辐射的干扰。同时还要考虑对热源的屏蔽，例如不要将元器件放在通风和温度不均匀的地方。

防护是一种用以防止因为交流或直流漏电而降低电路性能的技术。防护层是一个导电表面（外壳），通常放在靠近输入端或电路中易于接收杂散电流的其它部位。如果防护层安装适当，则杂散的漏电流被防护层所吸收。图1-3-28为防护技术简单地应用于高阻抗单位增益跟随器的输入。

从图1-3-28看出，由于漏电阻产生的漏电流 I_L 和杂散电容产生的漏电流 I_{AC} ，若不加防护器，则

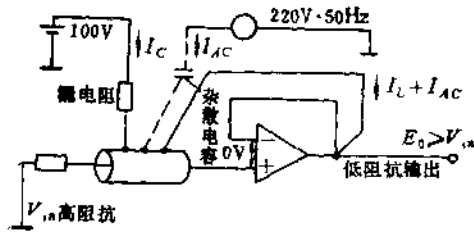


图1-3-28 用于高阻抗单位增益跟随器的输入防护

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

$$I_L = \frac{100V}{1011\Omega} \approx 1nA$$

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

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：

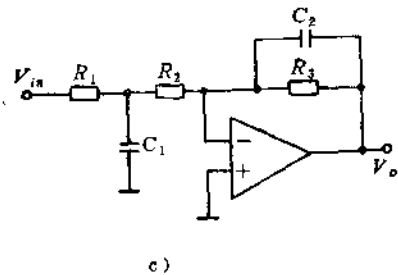
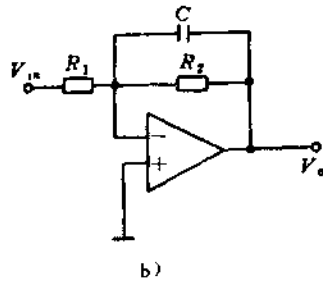
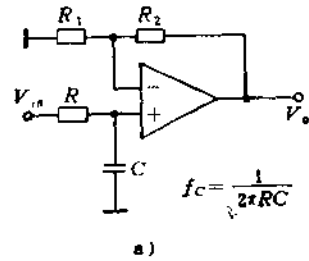


图1-3-29 简单的RC有源低通滤波器
 a) 用跟随器消除负载的一阶RC低通滤波器(增益的设置与时间常数RC无关)
 b) 反相运算放大器作为一阶RC滤波器(增益由 R_2/R_1 决定, 时间常数由 R_1C 决定。为了独立调节, 固定 R_2 , 调节 C 确定载频, 调节 R_1 确定增益)
 c) 二阶滤波器(具有两个独立可调时间常数)

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

$$\frac{|V_o|}{|V_{in}|} = \frac{R_1}{\sqrt{1 + (f/f_{c1})^2} \sqrt{1 + (f/f_{c2})^2}}$$

$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi C_1} \sqrt{\frac{R_1}{R_2 + R_1}}, f_{c2} = \frac{1}{2\pi R_3 C_2}$$

图1-3-30a、b 为采用单个运算放大器按跟随器接法的二阶和三阶低通滤波器的基本电路结构。只要改变电容和电阻的数值，可以在给定的截止频率下达到各种各样的响应特性。

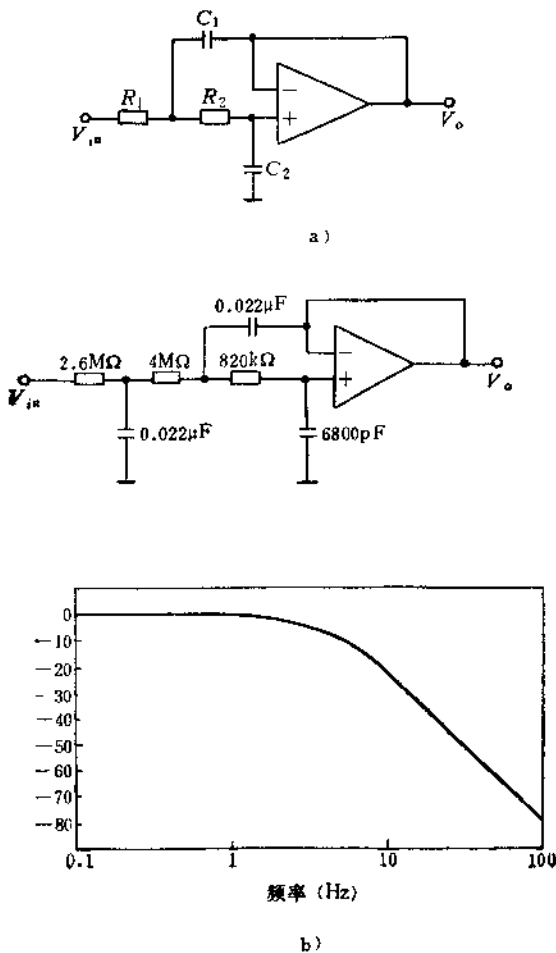


图1-3-30 二阶和三阶RC有源低通滤波器
a) 0.7临界阻尼和临界阻尼的二阶滤波器
b) 改进型贝塞尔三阶滤波器

低通滤波器可以有多个极点，而串接滤波器的3个传递函数连乘积，产生一个典型的高阶滤波器响应。换句话说，可将一个三极点的滤波器分解成一个两极点和一个单极点的滤波器。

低通滤波器应当尽可能靠近系统的前端。从理论上讲，滤波器可以放在线性系统中的任何一级，但是整个系统并不都是线性的。如果任何噪声出现在非线性级之间，则它对后面环节的影响都很大。滤波器采用小电容价格便宜，但非要采用大电容时，则必须用钽电容最好。如果利用电解电容则应注意其极性。

其放大倍数及滤波器的计算为

$$\frac{|V_o|}{|V_{in}|} = \frac{1}{\sqrt{(1 - 4\pi^2 f^2 R_1 R_2 C_1 C_2)^2 + [2\pi f C_2 (R_1 + R_2)]^2}}$$

假定 $R_1 = R_2 = R$ $R_1 = R_2 = R$
 $C_2 = 2C_1$ $C_2 = C_1 = C$

则 $f_o = \frac{1}{\sqrt{2} \pi R C_1}$ $f_* = \frac{0.66}{2\pi R C}$

设阻尼为0.71, 临界系数 $K = 2$ 及临界系数 $K = 4$ 时, 则有

$$\frac{|V_o|}{|V_{in}|} = \frac{1}{\sqrt{1 - (f/f_o)^2 + K \left(\frac{f}{f_*}\right)^2}}$$

尽管设计者作了最大的努力，如果仍然存在某单一频率的干扰，则需采用选通滤波器，普通的接法是双T型电路，如图1-3-31所示。根据需要选择电阻 R 及电容 C 值可得到不同的选频特性。其计算公式为 $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ 。先选定 C 值或 R 值，根据需要选通频率 f_c ，再计算出 R 值或 C 值。

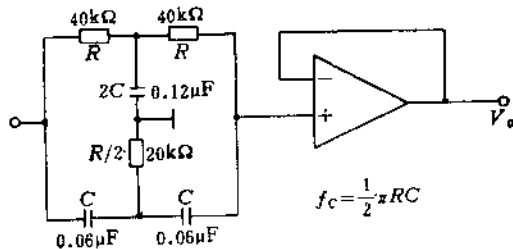


图1-3-31 双T形滤波器

另一种采用组件的滤波器是状态变量滤波器。它由解微分方程的反馈回路中的许多积分器组成，如图1-3-32所示。一个二阶状态变量滤波器就是两个积分器，还要有足够的放大器提供阻尼、反号以及线性阻尼等，使之用于多种滤波功能，因而可以用作高通、低通、带通或者带阻滤波器， Q 值也是

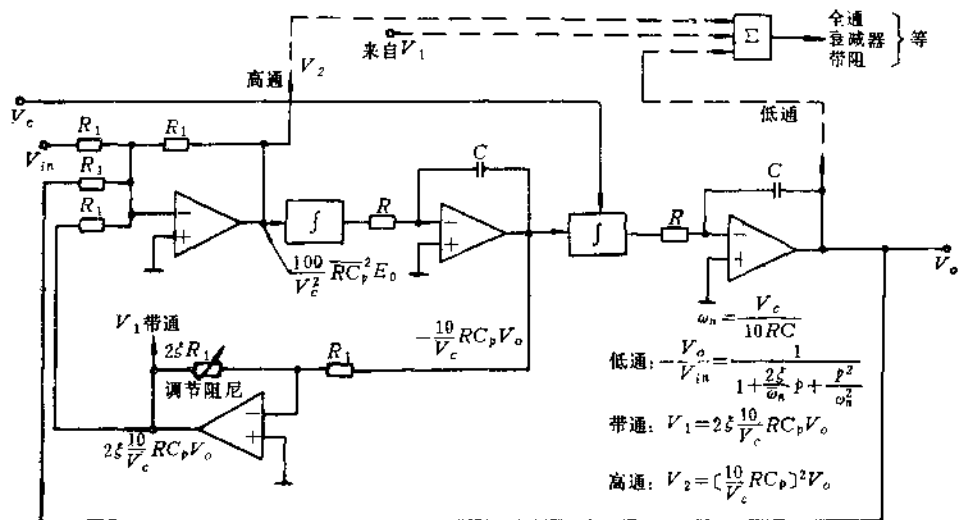


图1-3-32 具有乘法器控制固有频率的二阶状态变量滤波器

可调的，这就取决于电路如何接法。

$$\text{低通 } \frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} p + \frac{p^2}{\omega_n^2}} \quad (1-3-44)$$

式中 $\omega_n = \frac{V_c}{10RC}$

带通: $V_1 = 2\xi \frac{10}{V_c} RC_p V_0$

高通: $V_2 = \left[\frac{10}{V_c} RC_p \right]^2 V_0$

2. 特殊的滤波电路

要减少仪器放大器电路中的噪声和高频共模误差的简单方法是用一个电容并联在差分输入端之间。此电容和输入信号内阻形成 RC 滤波器，同时又减少输入端两边对地共模电容的不平衡，如图 1-3-33 所示。

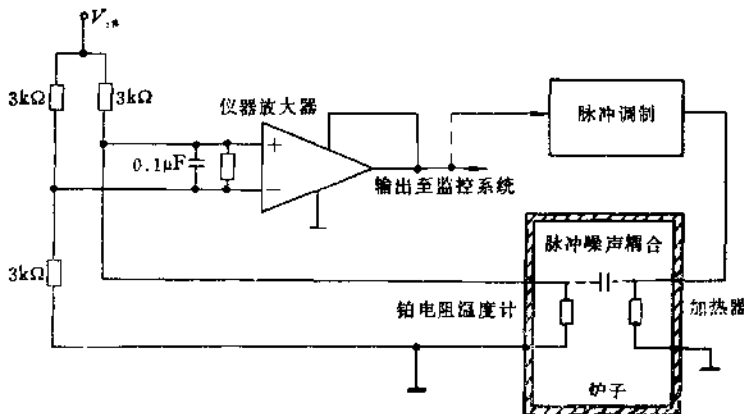


图1-3-33 仪器放大器的输入端用一个并联电容降低不平衡的脉冲噪声

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，为了不使用更多的硬

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。

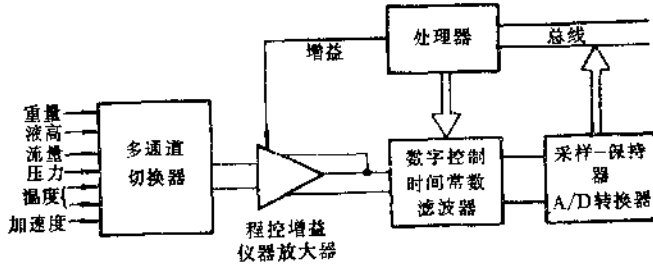


图1-3-34 用数字控制的软件编程滤波器的数据采集系统

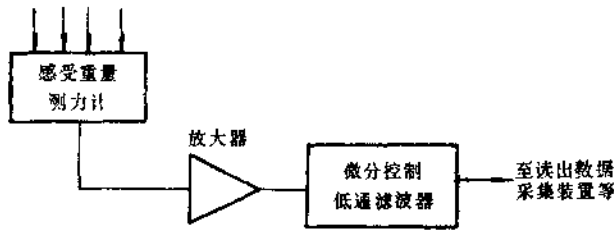


图1-3-35 微分控制低通滤波器

同步滤波器可以滤出接口中的噪声，这种滤波器采用采样保持技术。在某些系统中，噪声是直接受系统内部部件工作特性的影响。例如，开关式供电电源、电感元件、电流脉冲等经常产生噪声，其频率和幅度是可以预知的。在低频电路中，这样的噪声源所引起的瞬态变化可能使放大器饱和与缓慢地恢复。

减少这种噪声源的方法是在信号通路中利用采样保持电路。对预知的尖峰到来之前，对采样保持器发出命令，当预知的噪声衰减到可以接受的电平时，又使采样保持器回到跟踪状态，其工作框图如图1-3-36所示。

利用同步滤波器滤掉喷嘴点火所引起的噪声。对喷嘴点火器发出的同一个命令也可以用于开通采样保持器电路。在点火脉冲的同时，接口的输出正好保持点火前的电平。点火之后，接口的数据

又回到实时状态。当噪声的频率和扫描时间相比小许多时，这种同步滤波器不会影响测量精度。

3. 截止频率的选择

对于传感器接口电路的滤波，总是要求截止频率选得尽可能的低。噪声频率和有用频率离得愈远，滤掉噪声愈容易。

在多个传感器系统中，采用时分多点切换技术，对各个传感器进行扫描，必须严格注意扫描频率和传感器的频响之间的关系。

(三) 数字滤波器

1. 特点:

前面讨论了用RC网络和有源网络(称为模拟滤波器)来做动态误差补偿器。数字滤波器也同样可以用来做这种补偿器。其补偿原理一样，不再重述。所谓数字滤波器就是用数字方法实现滤波，用数字滤波器来做动态误差补偿器，就是用数字方法

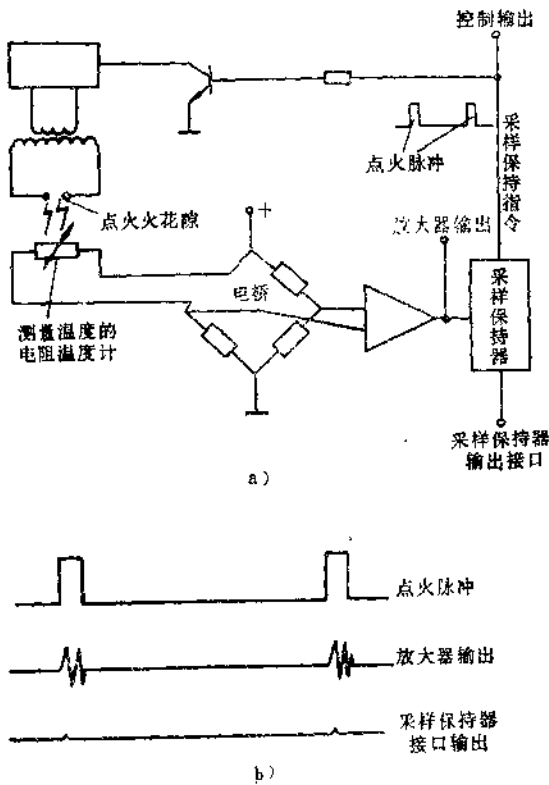


图1-3-36 同步滤波器的框图



图1-3-37 用数字滤波器作模拟传感器的动态补偿时方块图

识别是很有用处的。

(3) 容易实现给定传递函数 用数字滤波器来实现给定传递函数也远比模拟滤波器容易。因为数字元件相互间都有隔离作用，不需要象有源滤波器那样，添加许多缓冲级作隔离。

(4) 经济合算 在要求较复杂的系统中，采用数字滤波经济上也合算。这是由于一方面同一运算器可以分时工作，因此增加滤波路数只要相应增加存储器容量即可；另一方面，随着大规模集成电路的发展，现已制成一些单片数字滤波器（如可编程的二阶数字滤波器等），使成本大为降低。

对于模拟信号的测试系统来说，采用可编程的数字滤波器的集成块也是简单易行的。在无 A/D、

来做补偿器，对于输出模拟信号的仪表传感器或测试系统等来说，必须先将模拟信号变为数字信号，如图1-3-37所示。如数字滤波之后仍需模拟信号，则将滤波后的数字信号再经 D/A 变换器与保持器变成模拟信号。实际上很多测试系统都用数字计算机进行数据处理，在这种情况下，不仅不用 D/A 变换器与保持器，连数字滤波器本身也由数字计算机来完成，这时，数字滤波器就充分显示出它的优越性了。相反，滤波后仍需用模拟信号时，应用数字滤波器则比较复杂，这是因为附加的装置（A/D 与 D/A 变换器等）太多。

数字滤波器有如下几个优点：

(1) 灵活性大 只需重新写入一组系数于存储器中，就能改变它的性能。因此，同一滤波器结构或程序可按分时工作原理完成几个任务。

(2) 性能较好 它所实现的准确度远高于模拟滤波器，因为准确度主要决定于字长，而且模拟电路中的温漂、时漂等问题都可以免除。一些用物理元件难以实现的滤波问题，用数学方法就变得不难实现。模拟滤波时，低频时所需 L 、 C 过大，不易实现。某些数学上的理想情况，物理实现有困难，但从数学上实现却是可能的。此外，还能实现对信号的频带扩展或压缩等。这些，对数据处理和系统

D/A 与数字滤波器的集成块的情况下，数字滤波器的缺点是比较复杂，因而不适用于需用模拟信号输出的仪表传感器与测量系统等。

数字滤波器的设计思路是先根据要求（如动态补偿的要求等）设计出连续滤波器的传递函数 $W(s)$ ，然后采用 z 变换等，将它映射到 z 平面内，求得离散传递函数 $W(z)$ ，用它来逼近规定的要求。有了 $W(z)$ ，便可绘出实现它的框图，根据框图编出计算机运算的程序，这种方法称为软件实现法。另一种方法是用数字电路来实现，称为硬件实现法。下面先讨论软件实现法。

2. 数字滤波器的种类

(1) 有限脉冲响应型数字滤波器 有限脉冲响

应型数字滤波器的离散传递函数为

$$W(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \sum_{i=0}^N a_i z^{-i} \quad (1-3-45)$$

用差分方程描述时为

$$y(n) = \sum_{i=0}^N a_i x(n-i) \quad (1-3-46)$$

这种数字滤波器的输出只有一种输入信号 $x(n-i)$ 引起的, 输入一个脉冲, 输出便有一响应。输入有限个脉冲, 输出响应也是有限个脉冲, 故称为有限脉冲响应型的数字滤波器, a_i 称为滤波因子。最后一式在数学上称为卷(褶)积运算, 这种数字滤波亦称卷(或褶)积滤波。

(2) 无限脉冲响应式数字滤波器 该离散传递函数为

$$W(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{\sum_{i=0}^N a_i z^{-i}}{1 - \sum_{i=1}^N b_i z^{-i}} \quad (1-3-47)$$

用差分方程描述时为

$$y(n) = \sum_{i=0}^N a_i x(n-i) - \sum_{i=1}^N b_i y(n-i) \quad (1-3-48)$$

此式的意义是: 在 $n\Delta t$ (Δt 为采样周期) 时刻的输出 $y(n)$ 是由历史上 N 个输入 $x(n-i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 与当时的输入 $x(n)$, 以及历史上 N 个输出 $y(n-i)$ ($i=1, 2, \dots, N$) 确定的。当输入为脉冲序列时, 其输出除了与输入脉冲序列有关之外, 还与各输出脉冲序列 $y(n-i)$ 有关, 即任何时刻的输出都与在它前一时刻的输出脉冲有关。这样推下去, 脉冲响应是无限的, 故称为无限脉冲响应式的数字滤波器 (IIR)。

图1-3-38是一简单滤波器, 其过渡态的微分方程式为

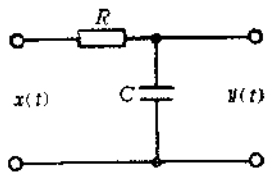


图1-3-38 简单模拟滤波器

$$RC \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$$

为了进行数字处理, 必须运用它们的采样值 $y(n) = y(n\Delta t)$, $x(n) = x(n\Delta t)$ 。采样间隔足够小时, 上式的离散近似为

$$RC \frac{y(n) - y(n-1)}{\Delta t} + y(n) = x(n)$$

$$\left(1 + \frac{RC}{\Delta t}\right) y(n) = x(n) + \frac{RC}{\Delta t} y(n-1)$$

$$y(n) = \frac{1}{1 + \frac{RC}{\Delta t}} x(n) + \frac{\frac{RC}{\Delta t}}{1 + \frac{RC}{\Delta t}} y(n-1)$$

$$= ax(n) + by(n-1) \quad (1-3-49)$$

式中 $a = 1 / \left(1 + \frac{RC}{\Delta t}\right)$,

$$b = (RC/\Delta t) / (1 + RC/\Delta t)$$

可见第 $n\Delta t$ 时刻的输出 $y(n)$, 除了取决于同时刻的输入 $x(n)$ 之外, 还与前一时刻 $(n-1)\Delta t$ 的输出有关, 因为 n 是任意值, 故各时刻的输出均是如此。所以, 最简单的低通滤波器, 在数字处理中就相当于 IIR 类型的滤波器。式(1-3-47)在数学上称为递推(或递归)公式。这种滤波器亦称为递归滤波器。

3. 数字滤波器算法框图

下面分别讨论一、二阶与 n 阶的数字滤波器的流程。

(1) 一阶数字滤波器

一阶数字滤波器的离散传递函数为

$$W(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1}}{1 + b_1 z^{-1}} \quad (1-3-50)$$

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

则 $x_0(z) = x(z) - b_1 z^{-1} x_0(z) \quad (1-3-51)$

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

$$y(z) = a_0 x_0(z) + a_1 z^{-1} x_0(z) \quad (1-3-52)$$

如用差分方程时, 相应的两个方程式为

$$x_0(n) = x(n) - b_1 x_0(n-1) \quad (1-3-53)$$

$$y(n) = a_0 x_0(n) + a_1 x_0(n-1) \quad (1-3-54)$$

根据上述两式便可绘出算法框图, 如图1-3-39所示。

(2) 二阶数字滤波器 二阶数字滤波器的离散

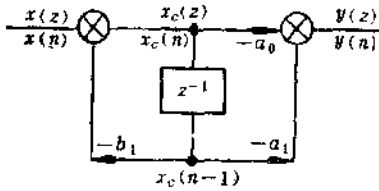


图1-3-39 一阶数字滤波器算法框图

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)

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

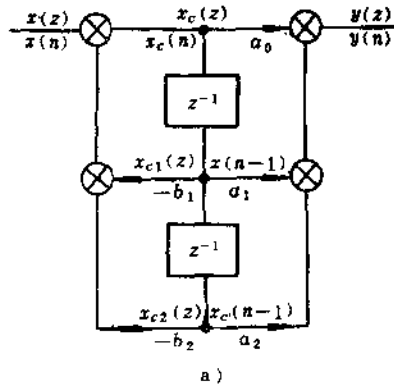
$$y(z) = a_0 x_0(z) + a_1 z^{-1} x_0(z) + a_2 z^{-2} x_0(z) \quad (1-3-57)$$

用差分方程表示时，相应的两个方程为

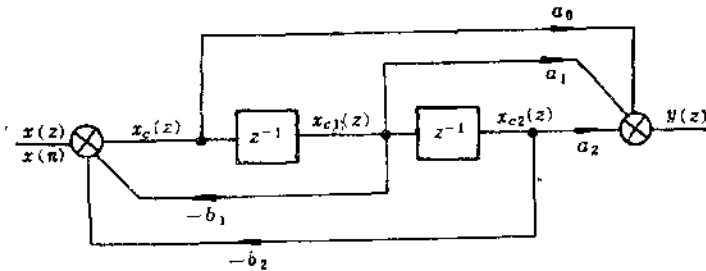
$$x_0(n) = x(n) - b_1 x_0(n-1) - b_2 x_0(n-2) \quad (1-3-58)$$

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

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

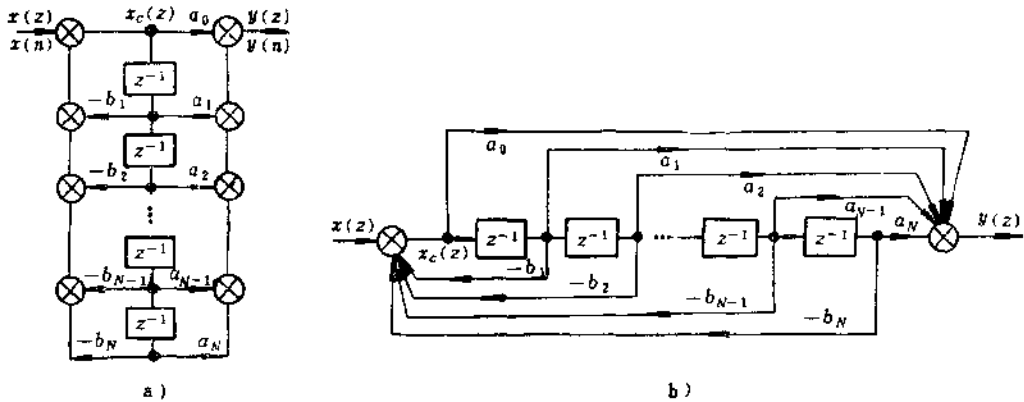


图1-3-41 N阶数字滤波器的算法框图

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

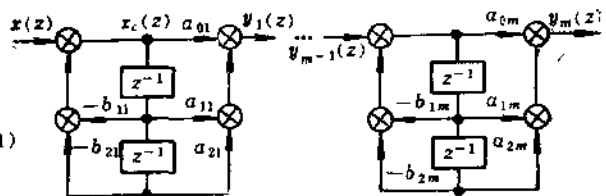


图1-3-42 级联式高阶数字滤波器

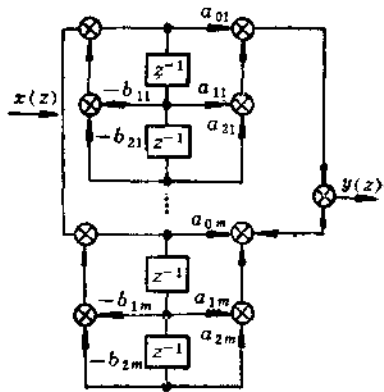


图1-3-43 并联式高阶数字滤波器

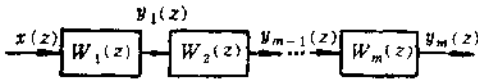


图1-3-44 级联式数字滤波器简化框图

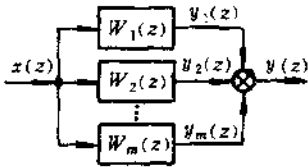


图1-3-45 并联式数字滤波器简化框图

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

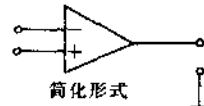
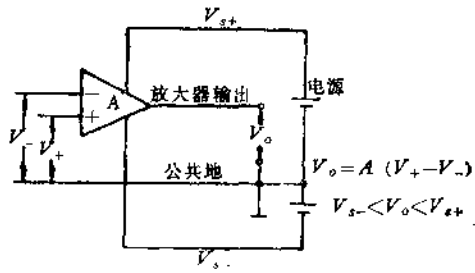
运算放大器主要应用于以高稳定增益的要求为前提的线性放大器中。运算放大器的高增益同深度反馈相结合所形成的放大倍数几乎与温度、时间和运算放大器的增益变化无关。其运算方式取决于外接元件和电路的接法，而不取决于开环增益的大小。

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。

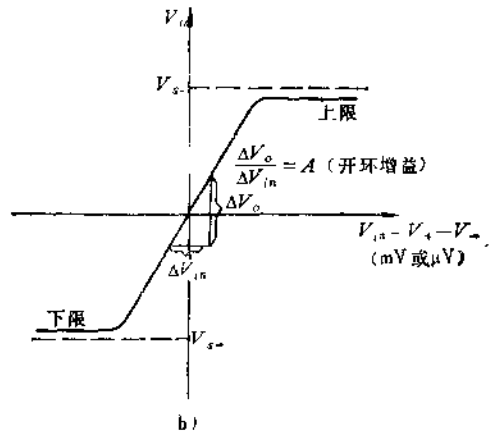
根据实际工程的需要，下面分别介绍几种典型的应用线路。

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

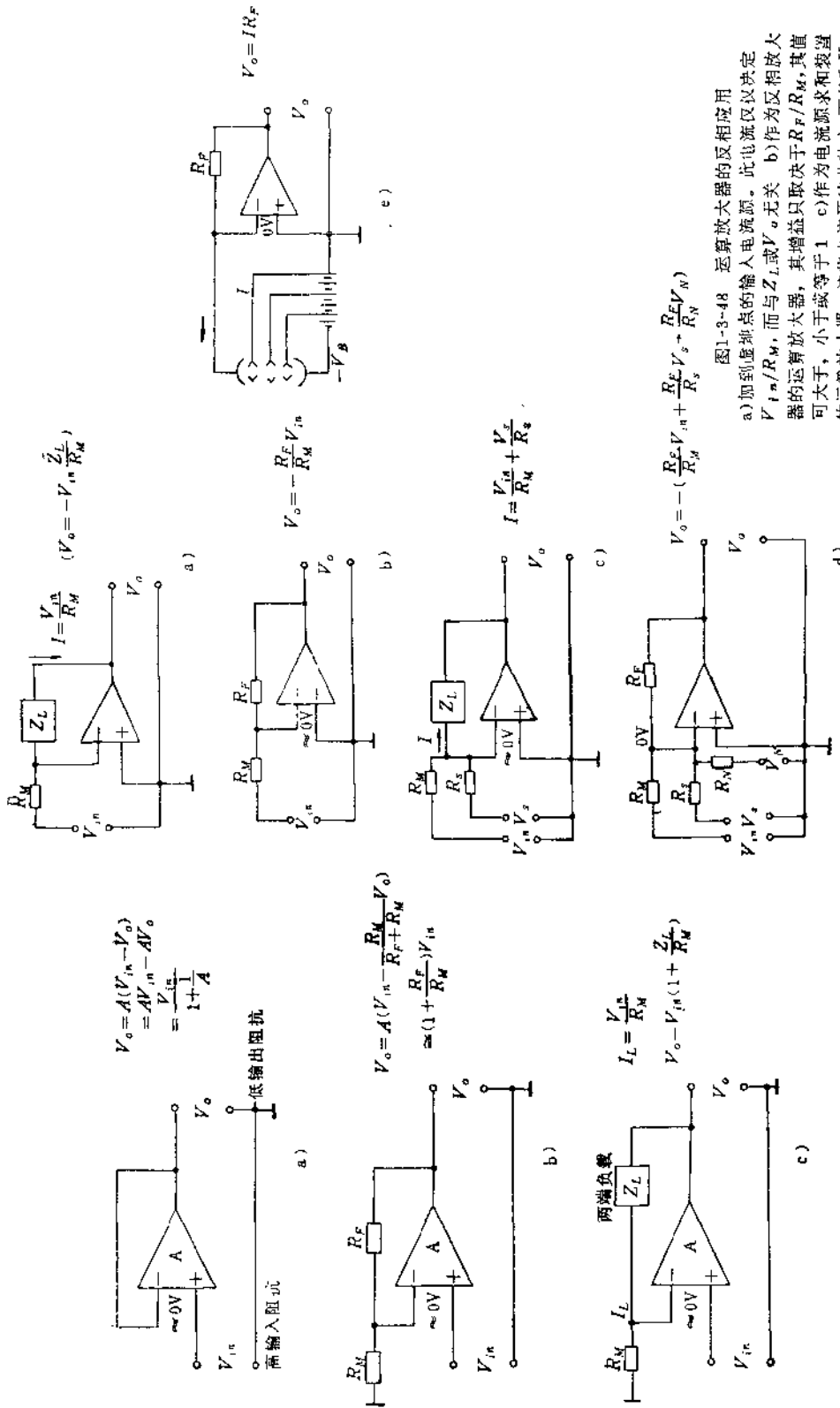


图1-3-47 作跟随器的运算放大器

- a) 单位增益跟随器 b) 具有高输入阻抗、低输出阻抗，有增益的跟随器，而增益取决于 R_F/R_M
- c) 电流发生器 I_L 取决于 V_{in} 和 R_M 与 Z_L, V_o 无关

图1-3-48 运算放大器的反相应用
 a) 加到虚地点的输入电流源。此电流仅以决定 V_{in}/R_M ，而与 Z_L 或 V_o 无关 b) 作为区相放大器的运算放大器，其增益只取决于 R_F/R_M ，其值可大于，小于或等于 1 c) 作为电流源和装置
 的运算放大器，这些电流源彼此独立，而且和 V_o 或 Z_L 无关 d) 作为求放大器的运算放大器，它
 自电阻比决定各自的增益或各自的衰减 e) 作为
 电流-电压转换器的运算放大器，对光电倍增管
 是零阻抗，即理想负载，输出电压用 R_P 来刻度

$$V_o = -(\frac{R_F}{R_M} V_{in} + \frac{R_F}{R_N} \frac{R_P}{R_N} V_N)$$

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_{o_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

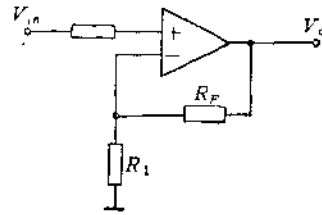


图1-3-49 基本的同相放大器电路

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 R_o 不为零， R_o 为有限值）	$R_{out} = \frac{R_o(R_1 + R_o)(R_{id} + 2\beta R_1)}{\beta A_v R_1 R_{id}} \approx \frac{R_o}{\beta A_v}$
10	电路的带宽（假设运算放大器的(-3dB)带宽在 f_{op} ，且 f_{op} 是第一个极点）	$f_{cp} = \frac{f_{op} A_{vc} R_1}{R_1 + R_1}$
11	电路的小信号建立时间(10%~90%)	$t_r = \frac{0.35(R_1 + R_1)}{f_{op} A_{vc} R_1}$
12	由于运算放大器的输入偏流而产生的输出直流电压（设 $R_F = 0$ ， $V_{io} = 0$ ）	$\Delta V_o = \pm \Delta V_{io} \frac{R_1 + R_1}{R_1}$
13	由于运算放大器的输入偏流而产生的输出直流电压（设 $R_F = 0$ ， $V_{io} = 0$ ）	$V_o = I_R R_1$

(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	$R_p = I_n^2 \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f}$ 如果此值为负, 就把 R_p 跟同相输入端串联, 并令 $R_p = \frac{R_1 R_f}{R_1 + R_f} - R_s$

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:

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

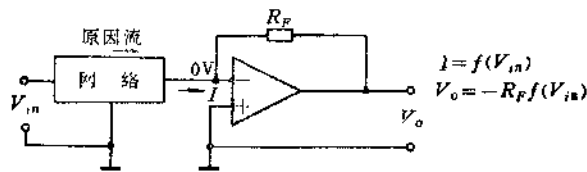
输出电压是 V_{in} 的反函数, 放大器靠改变 V_o 使网络的输出电流等于 $-V_{in}/R_M$ 。其计算公式如下:

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

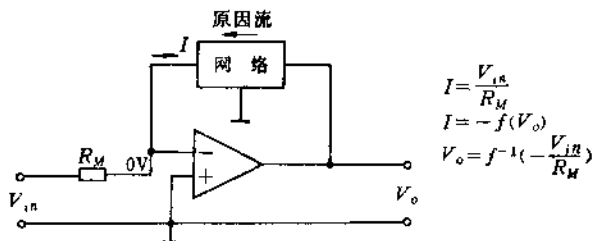
三、测量放大器

1. 概述

在测量和记录中常要求对小信号进行放大, 如微小的温度变化或者应变, 经过测量传感器转化后的测量电压仅在微伏级范围内, 该测量电压在进入测量问路的下一个测量环节 (A/D转换、磁带记录



a)



b)

图1-3-50 用运算放大器作正函数和反函数的运算
a) 输出电压是 V_{in} 的任意函数 b) 输出电压是 V_{in} 的反函数

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:

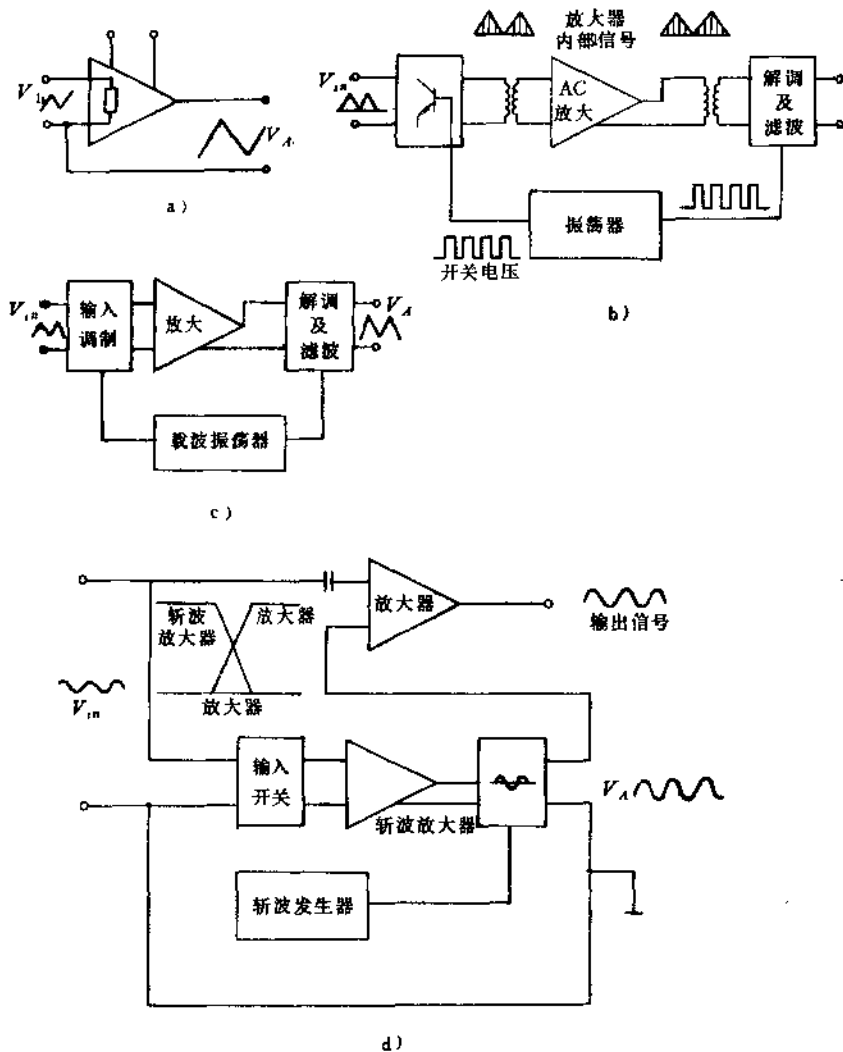


图1-3-51 直接耦合放大器和调制放大器结构形式

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、噪声和断路等毛病也完全被放大了，因此特别是当输入灵敏度较高时，就要求在线路上采取很多校正措施，以使放大器具有所需要的测量性能。图1-3-51a为直接耦合直流放大器的结构。

(2) 削波放大器（斩波放大器） 削波放大器是把输入信号通过电子削波器转换为交变电压。这一交变电压再通过电容或变压器与放大器输入端耦合，在一个各级隔离的多级交流放大器中放大。然后去除耦合，接相敏检波器并通过适当滤波削平。由于削波放大器各级之间采用了隔离直流电位，因而即使输入灵敏度很高，也能具有很高的稳定性和很小的零点漂移。可传递的频率范围受到一定的限制，以0 Hz开始，其最高的极限频率为削波频率的20%。

(3) 削波漂移补偿放大器 削波漂移补偿放大器兼有直接耦合直流放大器和削波放大器的优点。从结构上看，它是削波放大器与交流放大器的叠加。交流放大器的上限频率能达到MHz范围，其下限频率从100Hz开始，而削波漂移补偿放大器的

频响可从0 Hz开始，上限频率可达到100Hz。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法，在输入级利用振荡器提供的载波电压对测量信号调幅，通过隔离变压器将被测信号耦合到放大器的输入端，在多级隔离交流放大器中放大、去耦并解调（相敏检波器），通过滤波器还原并达到相应的输出电平。调制放大器传输频率的上限也约为载波频率的20%。

(5) 绝缘放大器 绝缘放大器的特点在于输入信号和输出信号之间的高度绝缘。放大器内部的信号传输常采用调制法，如调幅或削波原理。而较新的仪器则采用调频法，脉冲宽度调制技术，或者把两者结合起来。

图1-3-52为脉冲宽度调制的绝缘放大器的原理图。在输入信号中提供了高电位的测量信号，为了切断误差信号，采用了昂贵的保护电路，以提高调制传输方法所提供的测量信号的抗干扰能力。调制信号经过一个绝缘段，使放大器产生绝缘电压，而不传给输出回路，然后进行解调并重新得到放大的模拟信号。测量频率大约限制在50kHz范围之内。有效的绝缘电压约为6 kV。

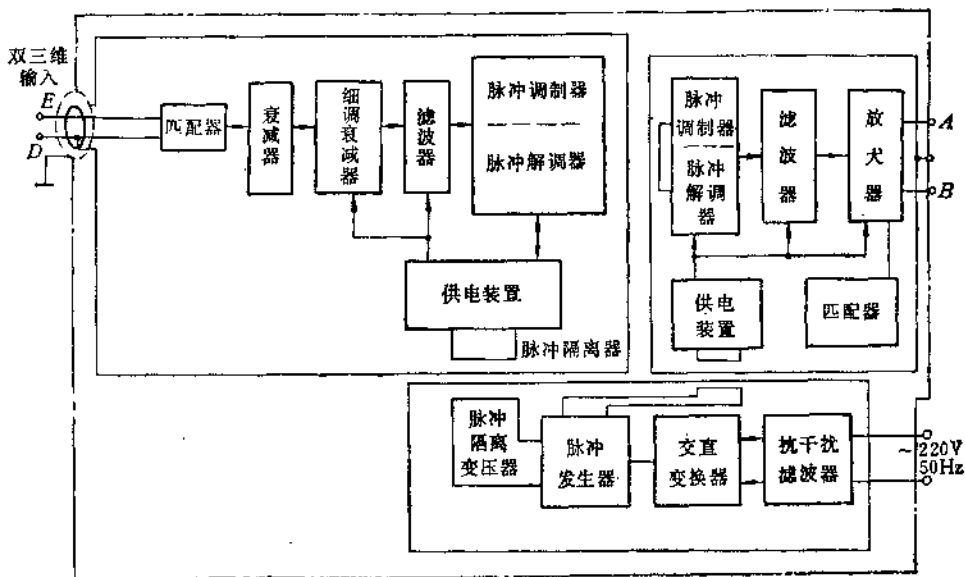


图1-3-52 脉冲宽度调制的绝缘放大器原理图

目前绝缘放大器电路还在朝着更高的绝缘电压方面发展,仍采用调制原理用光导装置传输隔离电压。

3. 直接耦合直流放大器电路

图1-3-53为直接耦合直流放大器的六种基本类型。

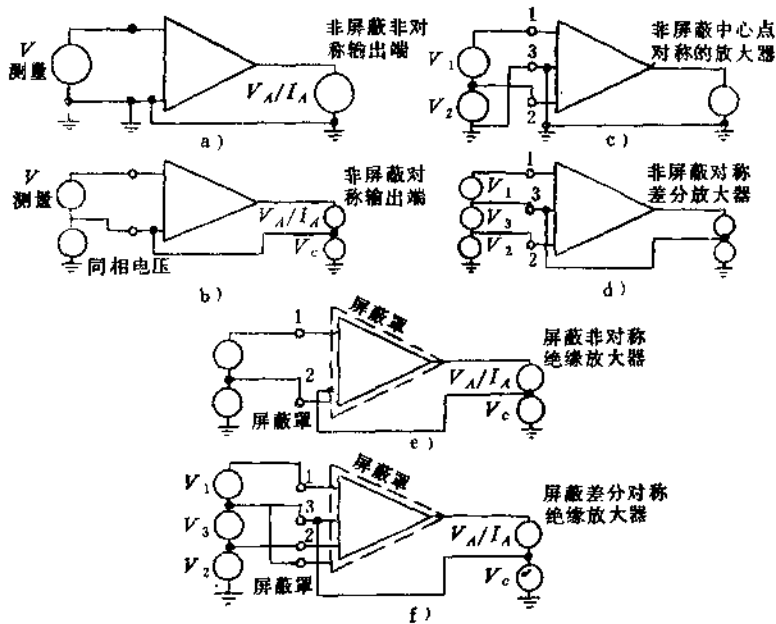


图1-3-53 不同信号源直接耦合直流放大器的基本类型

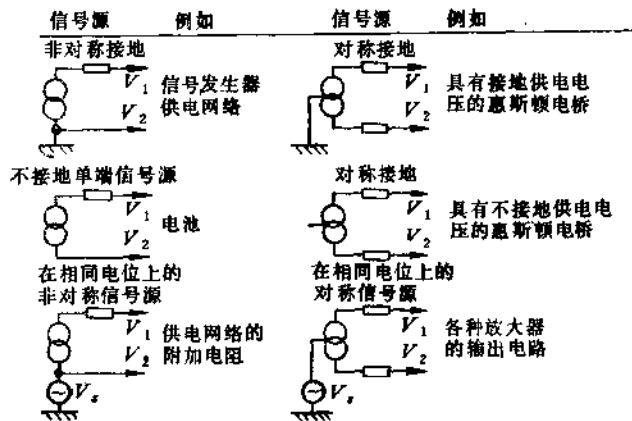


图1-3-54 信号源的分类

图1-3-54所示的线路与信号源输出电路形式一致。选择合适的测量放大器最好从匹配信号源与放大器的输入线路开始。所谓信号源,包括了测量传感器,电流测量用的分流电阻,测量电压信号用的分压器,以及匹配放大器(电荷放大器和TF放大器)用的输出电路等。信号源的特征参数是输出电流或电压,决定承载能力的电阻,以及输给放大

器的电位。电位问题经常是最困难的问题,在实际工作中是没有一个真正的零电位,理论上定义的“接地”是与无穷大的导体相连,而导体表面的电位 $\varphi_0 = 0$,但实际上 $\varphi_0 = 0$ 这样的等电位面是不存在的,在两个空间不同的接地点电位经常是有差异的。这样从电源线,地下电缆和电话线,特别是当有接地线时,都会耦合入电阻、电容和电感。通过

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 φ_1 和 φ_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 φ_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。

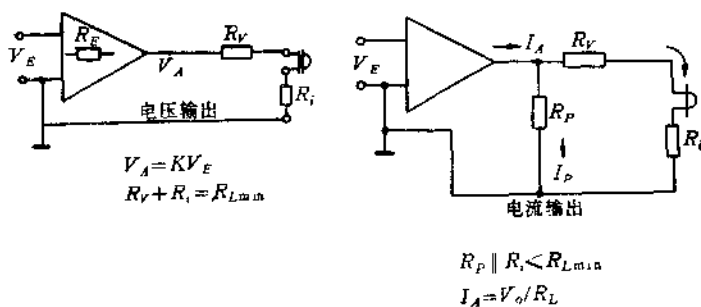


图1-3-55 电压输出和电流输出型放大器输出电路

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 大于规定的最低值。例如,对于快速偏转的检流计负载要求电流输出,负载电阻范围为 $0 \leq R_V \leq R_{max}$,而 $R_{max} < 100\Omega$ 时,输出电流 I_A 与测量电压 V_E 之间有严格的比例关系。

特别是当使用具有铜线圈的检流计时,更需要采用电流输出型。因为铜的温度系数很高(0.4%K),假如输出电流 I_A 受负载电阻 R_V 影响很大的话,将会导致很大的幅值误差。

与高阻抗的测量仪器连接时,则要求放大器阻抗高于最低值,至少大于1k Ω ,这样才能与负载无关,并能使输入和输出之间的电压成比例。

5. 信号源和放大器的组合

在上述类型的放大器中,有些组合方式是毫无问题的,有些则完全不能用,而有些则要求在一定限制条件下才能采用,如图1-3-56所示。

6. 干扰的影响

由于减少了漂移和噪声,才使测量放大器得到

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 Ω ,带宽的单位为kHz时,噪声电压 V_{eff} 的单位为V。

对于典型的参数电阻 $R = 1M\Omega$,带宽 $B = 100kHz$,很容易得出噪声电压的有效值 $V_{eff} = 40\mu V$ 。当输出信号用示波器记录时,输入灵敏度为1mV,则意味着有明显的干扰信号。而当示波器的截止频率选的比较高时,示波器所记录的噪声峰值则有可能比噪声频谱的有效值高10倍。

除了电阻噪声之外,还有晶体管本身所引起的噪声,而后者在频率较低时特别突出。

为了将噪声减至最小,高质量测量放大器都装有可转换的低通滤波器,以便放大器的上限频率范围根据使用条件不同而受到限制。按调定的滤波器极限频率的不同,信号的衰减与滤波器极数之间呈图1-3-57所示的关系。

根据传输的衰减特性,可以按最佳的幅频特性或相频特性设计滤波器,也常采用混合特性。

(2) 漂移、噪声、测量灵敏度和带宽 输入电阻 R_E 应尽量大,以便使信号源 V_s/R_s 的负载较小。

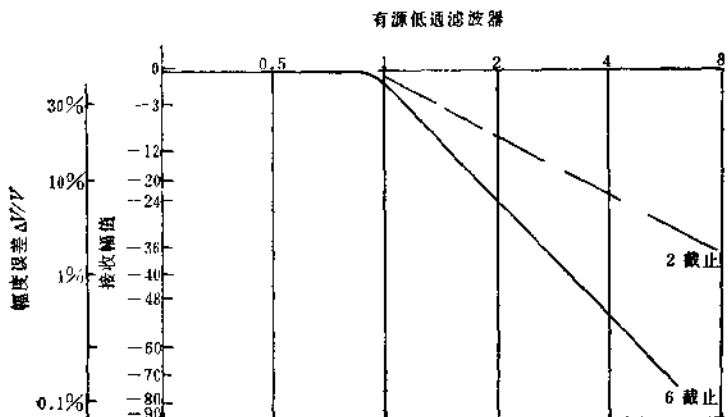


图1-3-57 有源低通滤波器的频率特性

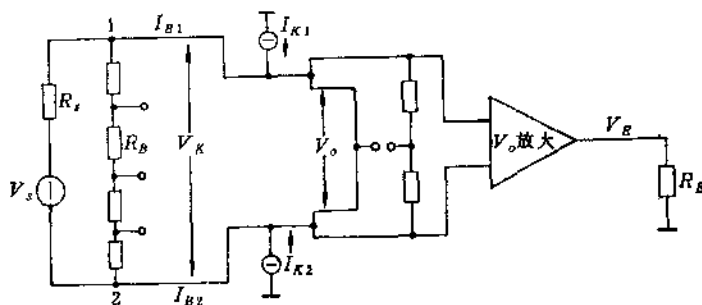


图1-3-58 放大器输入端的干扰影响

标准的电阻是 $1\text{ M}\Omega$ ，为了经济，也可用 10 或 $100\text{ k}\Omega$ ，特殊的情况下也有选用 $10\text{ M}\Omega$ （不包括特殊用途的放大器，如用于压电测量技术的负载放大器）。在改变量程时，要求输入电阻 R_E 保持恒定。

对于放大器，使用高输入阻抗之后产生了一个问题，即偏流进入了测量线路。在电阻 R_E 上产生了一个无法与测量电压 V_o 区分开的电压降。在非对称的放大器线路中，这一干扰效应完全加入了测量效应中，而对于对称的放大器，则为电流的差值 $I_{B2} - I_{B1}$ ，如图1-3-58所示。

当输入灵敏度为 1 mV ，而输入电阻 R_E 为 $1\text{ M}\Omega$ 时，只要偏流为 $1\mu\text{ A}$ ($= 10^{-6}\text{ A}$)，就足以使干扰电压等于测量电压。因此高稳定的测量放大器要有恒流供电 I_{K1} 和 I_{K2} 。当 $I_{B1} + I_{B2} = I_{K1} + I_{K2}$ 时，两个偏流互相抵消。在上述例子中，当干扰影响为 1% 时，必须精确地按上述条件将电流保持为 $10^{-12}\text{ A} = 10\text{ pA}$ 。

由于输入端晶体管的工作点和特性曲线的差异

会产生附加的偏移或断路电压 V_o 。即使成对的更换晶体管，电压 V_o 也要达到 1 mV ，即达到测量信号的数量级，利用一个可调的恒流源实现补偿。为了消除温度对晶体管偏流和开路电压的附加影响，可将放大器的整个输入级放在恒温箱中，使其温度超过最大工作温度（例如至 70 K ）。采取这项措施的漂移值，对于长时间漂移和温度漂移，常在 $0.5/10\text{ K} \sim 0.3/10\text{ K}$ 之间。

信号源的最高电阻 R_s （信号源内阻）取决于输入电阻 R_E 。由允许的测量误差的百分数即可得出 R_s 占 R_E 的百分比。如 $R_s = 10\text{ k}\Omega$ ，而误差为 1% ，则必须保证 $R_E = 1\text{ M}\Omega$ 。

7. 同相电压与同相抑制

具有单端接地的信号源和单端接地的放大器相连接时，其线路不会有什么困难。两个零电位 ($\varphi_0 = 0$) 可以连接在一起并予以固定，但是在测量工作中更常遇到的情况是 $\varphi_0 \neq \varphi_1$ 。这时得到的测量电压 $\varphi_2 - \varphi_1 = \mu$ 就将高于电压 $\varphi_1 - \varphi_0$ ，后者就称之为同相电压或共模电压 (CMV)，它在测量中是

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 φ_{01} 与放大器的接地电位 φ_{02} 之间就产生了 $CMV = \varphi_{02} - \varphi_{01}$ ，这在与现代的测量放大器输入端连接时就将产生很大的测量技术问题。当利用热电偶在气体中测量温度时，其接地点是在气体中，而放大器则必须在具有不同电位的另一地方接地。接地回路电压($\varphi_{02} - \varphi_{01}$)也经常是高于被测温度变化引起的电压。这时若不进行抑制，将会完全看不出测量效应。

同相共模抑制CMR可以通过放大器输入端的同相电压(CMV)和放大器输出端的同相电压(CMV_o)以及放大倍数g算出来，即

$$CMR = \frac{CMV_i}{CMV_o} g \quad (1-3-69)$$

式(1-3-69)也可以理解为一种比例，说明放大器输入端的同相电压必须比输出端大多少倍，才能使输出信号与测量电压一样大。例如放大器的输入端的同相电压 $CMV_i = 1V$ 时，在输出端产生的干扰信号 $CMV_o = 1mV$ ，而放大倍数 $g = 1000$ ，则可得 $CMR = 1000000 \approx 120dB$ 。当要求放大器输出端的干扰信号为有用信号的1%时，则必须考虑所要求的CMR值。

目前可以达到的值为140~160dB之间。但这是指极限值，只有当同相电压是直流电压时才能达到。而对于50Hz的交流电压还要减少10~20dB。

在图表中给出的数据往往是最佳值，是针对恒定的工作温度，对称的测量源电阻和直流的同相电压而言的。相反，如果是交流的同相电压，在其他条件都保持最佳状态时，其CMR值将按图1-3-59所示的曲线减少。

同相抑制的频率特性是最主要的影响因素。原

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电容式干扰电流，从而减少了频率对同相电压的干扰。

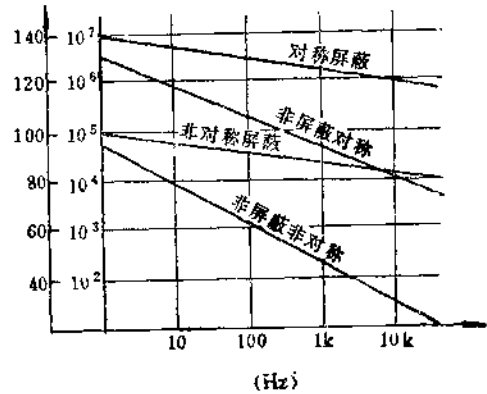


图1-3-59 不同放大器类型的幅频特性

8. 匹配仪器

前面已介绍过，在非电量电测技术中需要匹配仪器。由于电阻应变计信号调节器逐步变成了非电量电测技术中最重要的和最经常应用的测量线路，因此还要在此介绍一些有关问题。在实用工程中，几乎一律都是用直流电压测量电桥代替载频电

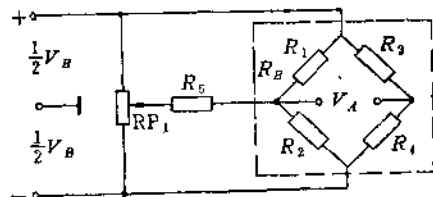


图1-3-60 电阻应变片电桥的平衡原理

压测量电桥。这种测量电桥除了起放大作用以外，还附着电桥供电电压和电桥平衡电源。电阻应变片电桥的平衡原理如图1-3-60所示。

跨接在可调电位器 RP_1 两端的电压，在电桥桥臂电阻 R_1 和 R_2 的节点上产生一个通过电阻 R_5 的电流。为了能获得桥路供电电压 $\pm 1\%$ 的平衡范围，选择电阻 $R_5 = 25R_B$ ，电桥的等效电阻，此处 $R_B = R_1 = R_2$ 。电位器 RP_1 的电阻必须比 R_5 值小，以保

证调节的线性。此外平衡回路还对电阻 R_1 和 R_2 有分流作用，因而减少了电桥的灵敏度，非常遗憾的是电位器 RP_1 的位置与电桥灵敏度的降低有密切关系。假如电阻片在空间位置上与含有平衡电位器 RP_1 的仪器是分开的，则引线电阻也起干扰作用。

为了克服这些困难，必然使线路设计复杂化，图1-3-60及图1-3-61即是一个有实用价值的解决方案。

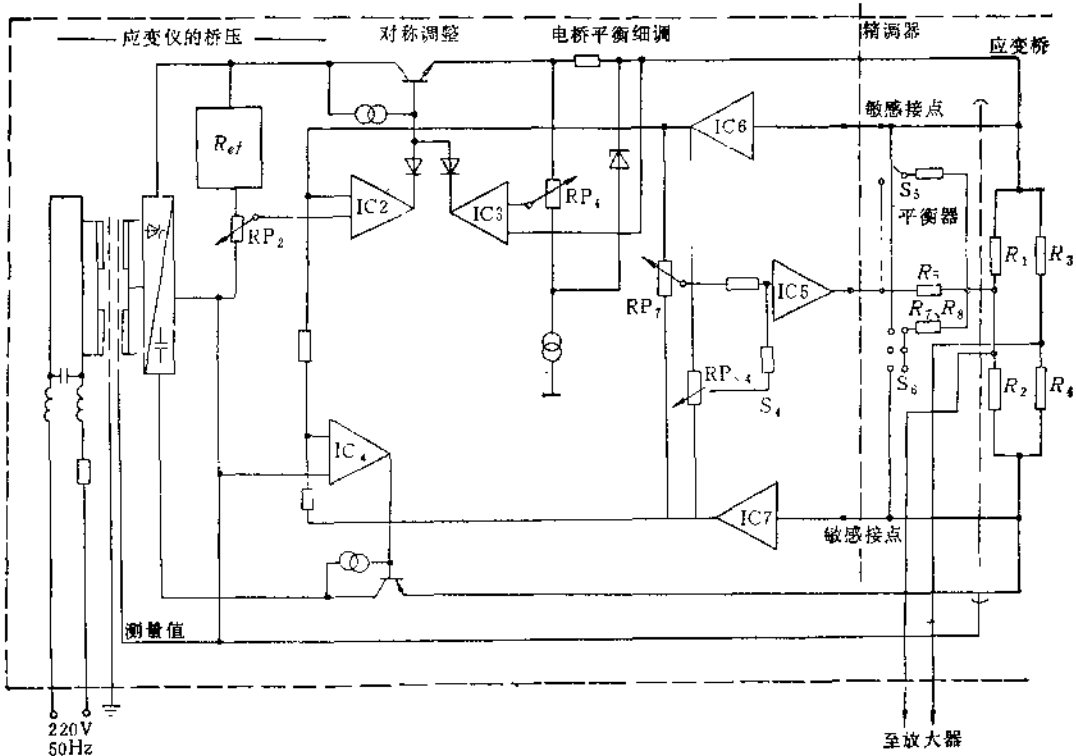


图1-3-61 电阻应变片电桥线路图

从图中看出此线路属于对称线路浮点接地、无级可调的恒定电压和恒定电流线路。按调节理论电位器 RP_2 和 RP_4 （具有数字旋钮的10位电位器）就可从电压源转化为电流源。加上传感器上的电压，经过敏感芯线（流经的电流小于 $1\mu A$ ）来控制电压调节器 IC_6 和 IC_7 。其输出电压作为实值反馈输给恒定电源部分的电压跟随器 IC_2 和 IC_4 ，并给平衡电阻 $RP_{3,4}$ 、平衡电位器 RP_7 和校准电阻 R_7 与 R_8 供电。经过这些措施，首先可以保证传感器的供电电压与理论值相等（这是保证输出信号精确计算应变值的基础）；第二，供电电压总是对称于参考电位（测量体），这两点也适应于恒流工作状态。在恒流供电时， IC_3 是电流源。作用在负载电阻处的

电压降，通过敏感芯线和 IC_6 ，作为参考电压反馈给电压调节器 IC_4 。这样，使负的供电电压跟着正的。这类电路形式比那种有一个正恒流源和一个负恒流源的电路装置优越，因为不存在同步问题了；第三是电源的特性得到了很大的改善，因为即使是补偿网络与测量点在空间位置上是分开的，但也可以保证补偿网络的供电电压与传感器的供电电压完全相同。这也适用于恒流工作状态。因此只有补偿器芯线的导线电阻（连接 R_5 与电桥中心点）有干扰作用，它将附加到电阻 R_5 上，并降低补偿电压的影响。但是该导线电阻与 R_5 （ $R_5 = 25R_B$ ，亦即 $2.5 \sim 15k\Omega$ ）相比是很小的，为此可略去这一影响。

对加法器和电压调节器 IC_5 调平衡时，应使补

补偿电位器RP, 转一圈恰好相当于转换开关S₄的一档。IC₃的输出电压很小并构成电阻R₅的电压源。由于IC₃的输出阻抗很小, 在其上的电压降很少, 因而电桥灵敏度的降低与滑线电位器RP₁的位置无关, 所以电桥衰减网络变成常数。

具有这种特性的电桥, 既适用于指针偏转测量法, 也适用于补偿法测量。电源可在0~20V或电流在5~50mA之间调节。在一般电源电压、负载和温度的变化条件下, 其灵敏度的稳定性不超过测量值的 1×10^{-3} 。当分辨能力为 1×10^{-6} 时, 平衡

补偿范围为 2.1×10^{-2} ; 换档后分辨能力为 2×10^{-6} , 补偿范围为 4.2×10^{-2} 。补偿器的稳定度与供电电压有关, 一般约为 $1 \times 10^{-6}/K$ 。还要考虑测量电阻片和附加电阻的温度系数, 一般要高得多, 在截止频率100kHz时, 幅值衰减为3dB。

对于大多数应用场合都是采用直接耦合的直流放大器。与载频放大器相比, 其优点是带宽较宽, 外形尺寸小, 使用简单和价格低廉。其技术指标如表1-3-20所示。

表1-3-20 放大器的技术指标

传输特性: 频响 上升达到满量程90%的时间、输入和输出的 相位延迟变换抑制(同相抑制)	0~20kHz (-0.5dB) 0~55kHz (-3dB) <4μs 相对于地线的不同输入 DC>100dB AC10Hz>70dB 50Hz>95dB 1kHz>100dB 放大器相对壳体 DC>140dB, AC50Hz>100dB AC50Hz>100dB
交叉干扰衰减(通道之间)	至30mV范围内, 其它量程全在54dB以上
增益: 电压输出 电流输出	最大1000倍 在所有范围内最大50mA
放大器误差	<±2%
线性度误差	<±2%
放大器零漂	<±0.01%/K
输入零点漂移 长时间负载漂移 噪声	<(±0.05%V±3μV)/K <50μV/8h 10Hz~1kHz, $U_{eff} = 0.07μV$ 10Hz~4kHz, $U_{eff} = 1.3μV$ 10Hz~15kHz, $U_{eff} = 2.3μV$
输出: 输出电流 过载电流指标 空载电压 负载电阻 内阻(电流输出) 输出电压 内阻(电压输出)	最大±50mA(可转接为电压) ±51~53mA耐短路 ±12V耐空载 最大为100Ω 0.1MΩ ±10V(过载电压最大为±12V) 可转接±5V 1Ω输出端电阻>1kΩ

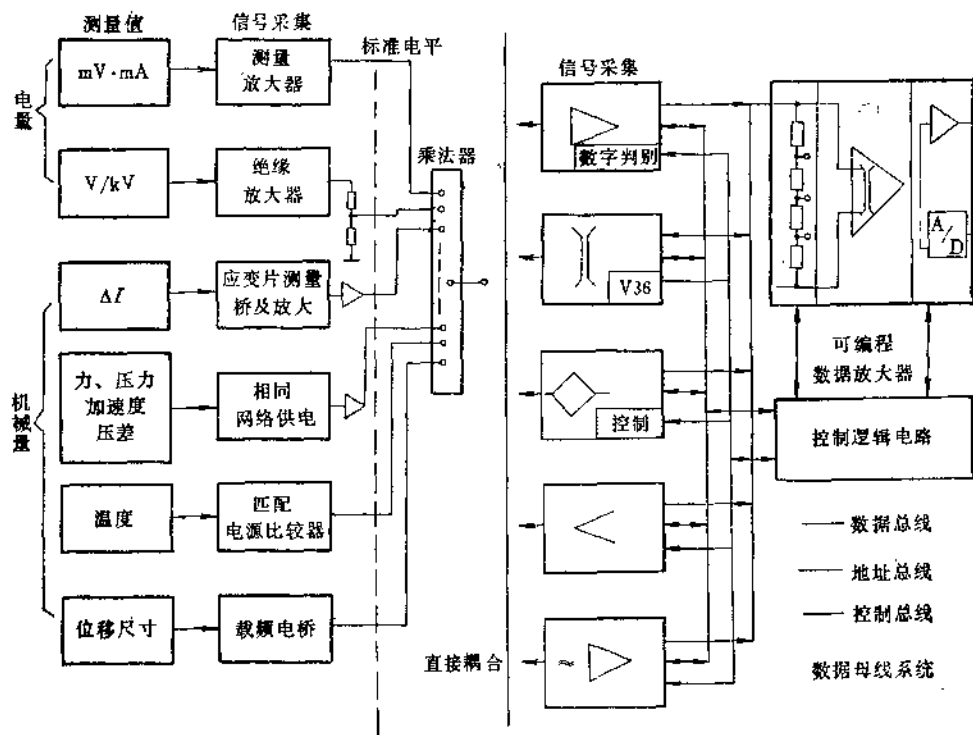


图1-3-62 多路测量装置的信号配直接耦合通道和母线系统

9. 多路放大器系统

在一套完整的测量值处理设备中，越来越多的采用一些系统，在这些系统中必须采用多通道的放大器技术。这种方法受到单位时间内处理数据量的限制，原则上这时只能利用计算机或大容量的磁带记录器来实现。多通道系统的构成有两种可能性，如图1-3-62所示。在小或中等测量通道数时，可以选用多通道系统，每一个通道配备一套完整的放大器或信号调节器，这类结构可使每个通道都具有尽可能宽的频带宽度，每个放大器的输出可以按通道分别进行处理或混合进行。

据有通道数很多，而每个通道的频率范围又受到限制时，则采用的系统中每个测量通道只包括信号调节所需的特殊部分，如无源补偿单元：

而所有其他元件，则装在整个系统中或集中装成几个部件，如编程系统、可控测量放大器，传感器信号源和模拟-数字转换器等。

在实际应用中，可以选用固定程序或自由的可编程系统，但都是采用母线制。母线系统的成本稍高，但其优点是可以利用插接抽屉方式任意组合系统中的组件。将微处理机用于系统控制是现代的技

术水平。

功能流程为数字控制器通过地址线触发某一个测量通道，与此同时，为传感器供电的电流或电压源获得了该通道所需的规定值，并送入通道。

中央测量放大器按每个通道所需的灵敏度编程。放大器接收到被测信号，经放大后再送给后接的模拟数字转换器。经过数字化的信号再进入微处理机(计算机或磁带记录机)。发出接收指令后再转换到下一通道，并重复上述循环过程。对于这种装置来说，其频率范围或单位时间的数据率，一般皆取决于微处理器的能力。按照通道的特殊性选择扫描速度，可以与每个通道所要求的截止频率相匹配。

频率和数据率随着测量通道的增加而减少。为此，在很多情况下，必须用几个微处理器并联，以使通道频率不致下降太多。

四、接口电路放大器

虽然所有的技术指标都有关系，一个也不应忽视，但是对于传感器的接口电路而言最重要的技术指标则是与增益(范围、计算公式以及线性度)、失调、偏流以及共模抑制等有关。

增益范围是指在所规定的性能下的增益范围。

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,由于存在着噪声和漂移可能在更高的增益下就不实用了。

增益计算公式误差或称“增益精度”,这个指标表示当 R_0 为标称值时,增益计算公式本身的偏差。但使用者可以在整个系统中别的地方微调增益或者补偿增益误差。从传感器到A/D转换器,系统中模拟部分的各级误差作为一个集中的增益误差来考虑,然后可以在应用数字处理的过程中进行自校。增益与温度关系的指标给出增益与计算公式偏离的温度函数。

非线性度定义为输入与输出曲线图上直线的偏离。线性误差的大小是指偏离最佳直线的最大值,其输出的摆动达到的满刻度值,其误差量用满刻度值的百分数表示之。

当初始的失调电压调到零以后,失调电压随时间和温度的漂移又会产生误差。在包含有“智能”处理器的系统中能够校正整个测量电路的误差。但目前这样的应用还是相当少的,而在大多数的应用中,还是要考虑放大器对系统的误差的影响。

失调电压和漂移还是增益的函数。在输出端测量到的失调电压等于一个常数项再加上一个与增益成正比项。对于在1~1000倍的整个增益范围内具有规定性能的放大器,其失调电压中的常数项基本上是单位增益下的失调电压,而比例项(或斜率项)等于增益从 $G=1$ 变到 $G=1000$ 时输出失调的变化量除以999。如果将输出端出现的失调电压折合成输入端失调电压,只要将输出端失调电压的总量除以增益即可得出。因为当增益为1000倍时失调电压中比例项是主要的,所以被称为 $G=1000$ 时折合到输入端的失调电压(RTI)。在任何其它的增益时,失调电压等于单位增益时的失调电压加上增益与“ $G=1000$ 倍时折合到输入端失调电压”的乘积。

对于失调电压的漂移也可作同样的考虑。例如,假定规定折合到输入端的失调电压(RTI)的最大值在 $G=1$ 时为 $25\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,在 $G=1000$ 时为 $2\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,于是在此增益范围内的任何增益下,其漂移(折合到输入端)为 $(23/G+2)\mu\text{V}/^\circ\text{C}$,而在输出端相应的漂移则等于 $(23+2G)\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 。作为电源电压所产生的失调电压也是规定为一个或多个增益时折合到输入端的失调。

运算放大器中的偏流也一样,也可以看作是一

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、共模电平、电源电压的变化而产生的偏流间的差值也会导致失调电压和共模误差。

虽然仪器的放大器具有差分输入,偏流尽管很小,但必须有一个供给偏流返回的通路,如果没有这个通路,偏流就会对分布电容充电,结果引起输出端的不可控制的漂移以至饱和,因此当放大象变压器、热电偶以及交流耦合信号源等这样的“浮动”信号源的输出信号时,从两个输入端到地(即放大器电源电压的公共端)必须有直流的“泄漏”通路。如果直流通路不能实现,就要采用隔离器。

仪器放大器的共模抑制比是当两个输入端有等量的变化时所引起输出变化的量度。通常在给定的频率和规定的不平衡信号源内阻(例如60Hz和1k Ω)的情况下,加上满度的共模电压变化的条件下测定其共模抑制(CMR)。仪器放大器的共模抑制比($CMRR$)定义为信号增益(即差分增益) G 与共模增益之比,而共模增益等于出现在输出端的共模误差信号与输入端共模电压(CMV)之比。用对数形式时,则 CMR (分贝) $=20\lg(CMRR)$ 。在仪器放大器中, CMR 典型值的范围为70~110dB。模块式信号调理器中的高增益电桥放大器最小工频的共模抑制为140dB的数量级。

五、隔离放大器

(一)隔离放大器概述

隔离放大器或称隔离器,其输入电路与输出电路和电源没有直接的电路耦合。隔离器专门用于要求使用安全及存在着高共模电压(高到几千伏)的情况。它具有高的共模抑制能力,能够准确地测量直流或低频的电压或电流;在噪声的环境下以高的阻抗传送电源线上所接收的信号;为了保证测量的安全,应该使直流和工频泄漏都必须维持在低于某一规定的最小值。这种隔离放大器主要用在与医疗设备有关联的电力环境中,用在普通电站和核电站中,以及用在自动化试验设备、工业过程控制系统和野外的便携式的测量仪器中。

当然,从原理上说,任何非导电的媒介都可用作电的隔离,这包括光、超声波和无线电波。目前广泛应用的媒介是高频载波变压器,因为它成本低,相对地讲容易实现隔离。通过这种变压器的耦合可将电源送入输入电路,并且将信号从输入电路

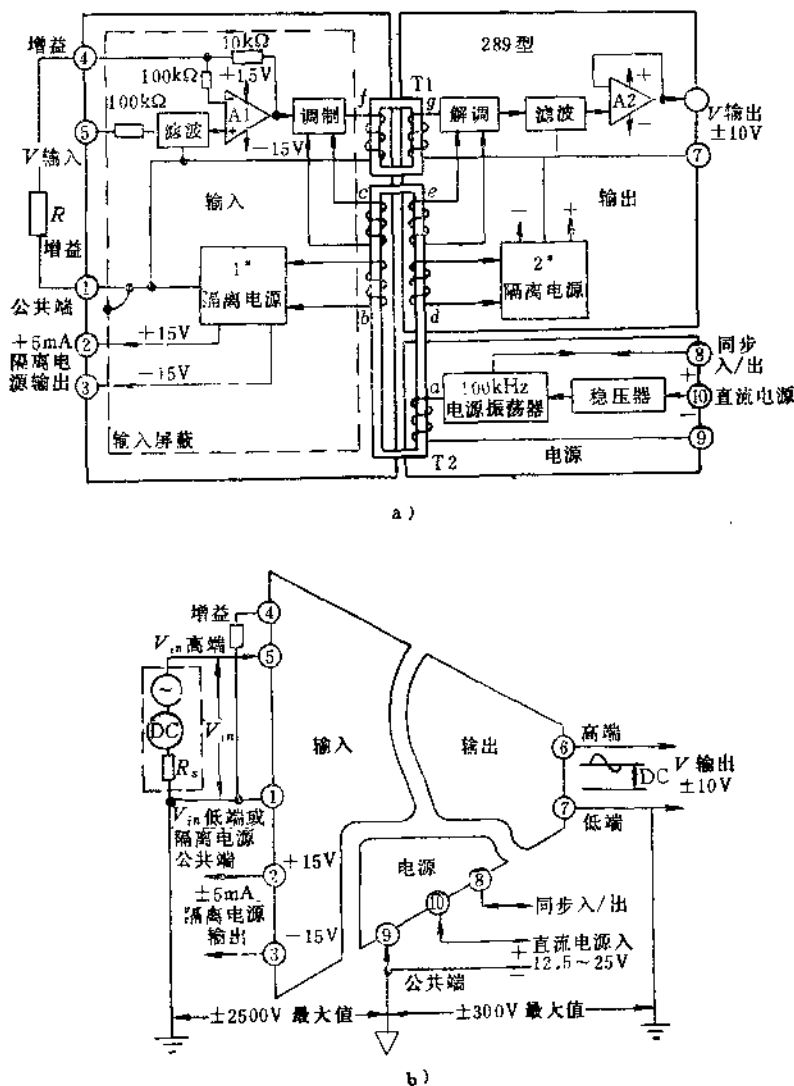


图1-3-63 典型的隔离放大器结构

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

的几种使用形式,如有许多输入通道要隔离,这样的系统可由公共的振荡器很容易地实现。这样作还有另外的好处,它可以消除由于小量的串话引起拍频的小误差。在任何情况下,要求用在多通道系统的隔离器应该是可以同步的。

隔离放大器的许多应用中非常有用的另一种形式就是隔离运算放大器。这种放大器里有一个运算放大器作为前端,它可以用来完成运算放大器能做的运算(包括积分、微分、求和等等),还能将输出与输入隔离。

(二) 隔离放大器的技术指标

隔离放大器的主要技术指标有两类:性能指标和隔离指标。性能指标与运算放大器和仪器放大器相类似,但要增加一些,如非线性、输入端对输出端的共模抑制,输入端对防护端的共模抑制、折合到输入端的失调电压、输入噪声。关键的隔离和保护指标包括最大的安全差分输入、输入对输出的共模电压、泄漏电流和过载电阻等。

输入对输出的共模抑制比表明了输入和输出端之间共模电压的抑制能力。在处理叠加在高共模电压上的小差分信号时,这是一项很重要的指标。

输入端对防护端的共模抑制比表明了抑制信号低端和防护端之间电压差的能力。应该考虑到在应用中,防护端和信号的低端不能直接相连。

最大的安全差分输入电压是指能够施加于两个输入端之间的最大安全电压。当存在着高的故障电压时应考虑到这一点,对于失效-安全设计是很重要的。

输入端对输出端的共模电压(CMR)是指能够加到输入对输出的地端或对电源的地端的安全电

压。这对高共模电压的输入或输入端出现瞬态高压的应用中是必须考虑的。

泄漏电流是指在输入端接到电源线时最大的输入泄漏电流。在医疗应用中,保证病人的安全这一点是必不可少的。

过载电阻是当放大器饱和时从输入端看进去的输入电阻,它限制了差分的故障电流。

隔离放大器的系列产品正在不断地发展扩大。除了目前的隔离放大器、隔离运算放大器和隔离电源(交流-直流转换器)以外,还有隔离的电压-电流转换器、热电偶信号调理器、高低电平乘法器和D/A转换器等更多的品种。

(三) 隔离放大器的典型应用

在使用隔离放大器时所考虑的一个最重要的问题是放大器浮离方法的问题。下述的一些原则有助于使用者充分发挥隔离器的性能和减小虚假的噪声和干扰。因为比较普遍的电噪声源来自地线回路、静态偶合以及电磁干扰,而这些原则涉及到在恶劣的环境中对毫伏级低电平信号的保护。

第一,使用双绞屏蔽电缆以降低电感和电容的耦合。

第二,如有可能按图1-3-64所示,用共模电压源 E_G 驱动传感器的电缆屏蔽线S,可以减少有效的电缆电容。将屏蔽接到信号的低端B可以实现这样的要求。但是,这并不是到处都可能实现的。例如,在某些情况下,屏蔽端必须用所测量的介质的一部分和信号低端分隔开,于是在屏蔽端与信号低端之间出现共模信号 E_M 。所以在输入端与防护端之间的共模抑制能力就应该能够抑制共模信号 E_M 。

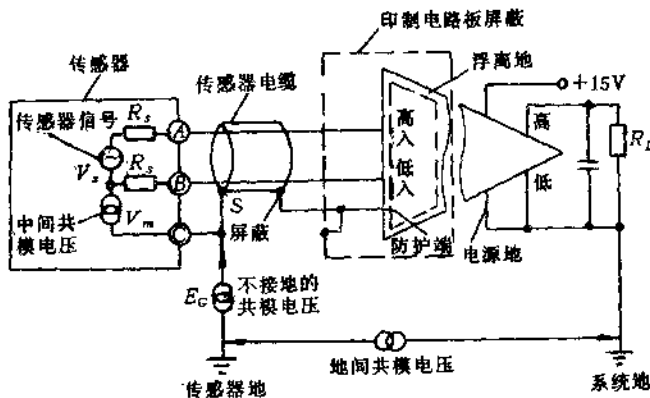


图1-3-64 仪器与隔离放大器之间的连接

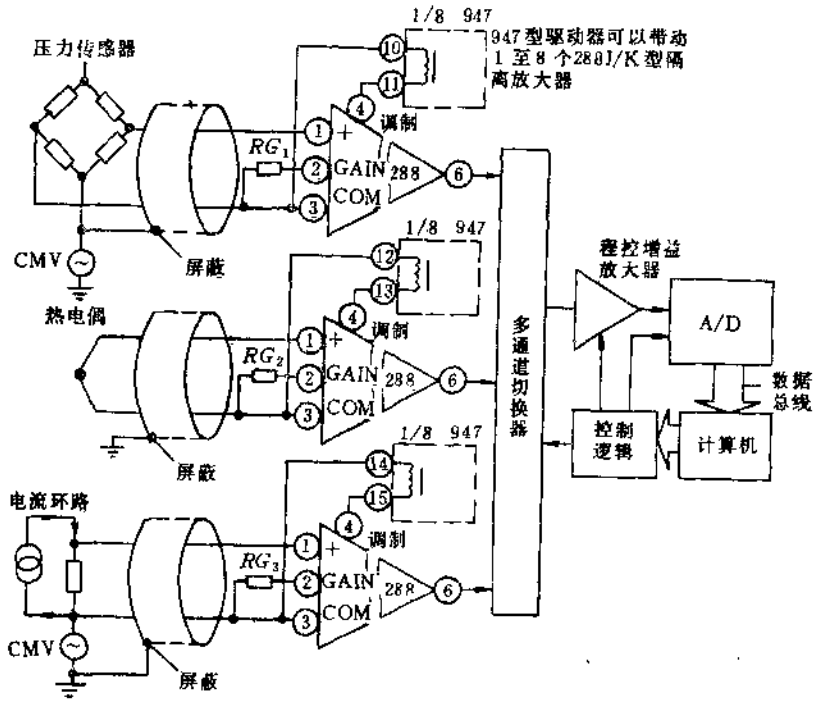


图1-3-65 三通道隔离数据采集系统的前端

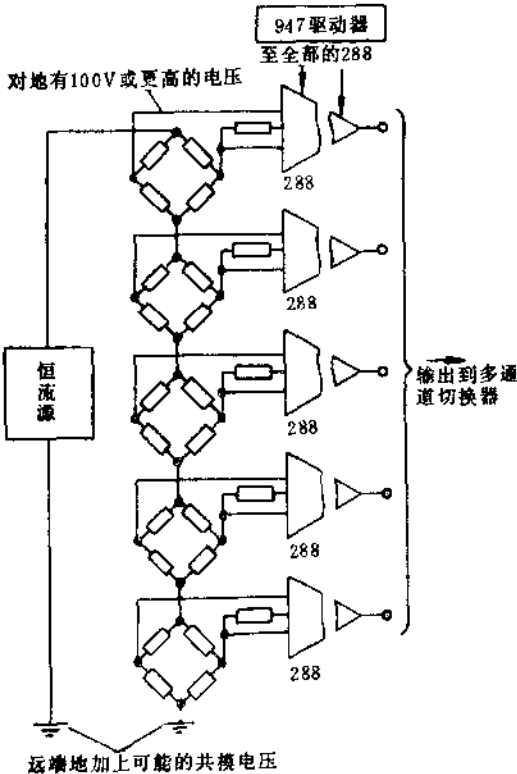


图1-3-66 高共模电压隔离放大器电流激励电桥电路

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，使感应的干扰减到最小。

多通道隔离器具有某些特殊的用途，图1-3-65和1-3-66表示其中的两种应用。

在图1-3-65中所表示的同步隔离器(288K)及其驱动器(947)作为数据采集系统的三通道前端,此系统的输入与输出以及通道与通道之间提供850V的隔离。这样一来,传感器可以完全浮离,各传感器之间的地线环路问题和输入地与输出地之间的地线环路问题都不存在了。高的额定共模电压和输入端的保护功能防止瞬态对多通道切换器的影响,在恶劣的环境中保证可靠地工作。保持数据完整性的其他特性是288K的高共模抑制比(92dB)和低的非线性(0.05%),而且在多通道的应用中都是低价格的。

在图1-3-66中,许多应变、压力和温度的测量电桥串成一串由恒流源供电,只用一组电源保证使每个电桥接受相同的激励电压(如果这些电桥的电

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的。

第三节 偏置与线性化

前面已经讨论了传感器与仪器的接口问题、干扰问题、信号调理中所利用的放大问题。在这一节里重点讨论提高测量精度和灵敏度的问题, 为提高测量精度和灵敏度常采取以下措施。

一、偏置

偏置就是利用模拟技术将信号的电平平移一个预定的数量, 其典型的应用有:

1. 在大的初始值的基础上测量小的变化量。
2. 利用具有绝对值刻度的仪器测量增量 (从绝对压力测压差, 从绝对温度K求摄氏温度 $^{\circ}\text{C}$)。
3. 减小共模电平。
4. 恢复或引用一个偏置量 (例如, 为了传送模拟信号, 将0~10V范围内的电压转换成4~20mA范围内的电流)。

在某些应用中, 并不一定要精确地研究某一固定不变的量值。例如, 隔离器根本不传送共模电压, 因此隔离放大器可以用来测量架在一个大的共模电压上的很小的差分信号。如果传感器输出部分是一个交流信号, 则可用电容器或变压器隔开直流分量。

如图1-3-67所示, 用桥式电路进行的偏置。在这里, 传感器是一个线性的分压器, 所关心的变量是偏差为多少个半刻度值, 即 $k\frac{V_b}{2}$ 。设桥压 $V_b = 10\text{V}$, 则 $\frac{V_b}{2} = 5\text{V}$, 当偏差 k 等于0.1%, 表示有5mV的变化。在电位器的滑动点与 V_b 的低电位之间, AG两端接入精密的数字电压表, 可读得+5.005V, 不考虑初始的数字, 则可读到+0.005V的正向偏差。但是只要电源电压或者电表的读数有0.02%的误差, 即输出, AG两端对此误差很敏感, 则将会引起 $k\frac{V_b}{2}$ 的测量值有20%的误差。

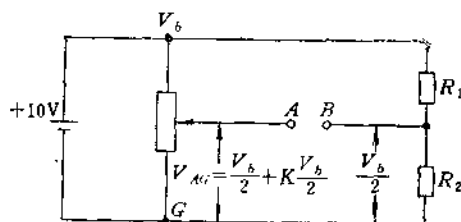


图1-3-67 用桥式电路进行偏置

如果在另一边用精密的配对电阻产生偏置电压 V_{BG} , 形成一个电桥, 从电表读其差值时, 即 $V_{AB} = 0.005\text{V}$, 如果电源电压有少量的变化, 引起两边电压(V_{AG} 和 V_{BG})的变化大致相等 (在上面的例子中为微伏量级), 其影响互相抵消。这样可以用电压表的小量程进行检测, 故可以提高精度。

电阻式传感器本来不包括电桥, 但是使用电桥变换线路后, 将对测量非常有利。使用这样的传感器的例子很多, 例如, 有热敏电阻、电阻温度计、应变计等。

另一种偏置形式用于简化测量, 将绝对压力转化为差压, 绝对温度转化为摄氏温度, 或者用在转换具有偏置量程的高电平传感器的输出。这些技术是在运算放大器或仪器放大器的输入端简单地相加, 或者在仪器放大器采用参考输入。如图1-3-68所示, 经过一个电阻将传感器输出的 $1\mu\text{V}/\text{K}$ (绝对温度) 的绝对读数转为 $1\text{mV}/\text{K}$ 的刻度, 再偏置一个273.2mV的电压, 其输出电压的毫伏数代表摄氏温度($^{\circ}\text{C}$)。图1-3-68表示一个高电平压力传感器, 其输出电压范围为2.5~12.5V, 代表0~100Pa的压力, 对传感器的输出加偏置可以得到压力为零时输出电压也为零。

当热电偶用在对参考 (冷) 结点不便于提供冰浴的场合下 (绝大多数的应用属于这种情况), 冷端补偿就是一种特殊的偏置形式。偏置电路测出冷结点的环境温度, 再产生一个近似于预定的电压, 以相反的极性加到冷结点所产生的电压中。电路的纯输出电压便是测量结点的温差电压。

二、非线性和线性化的基本概念

(一) 基本概念

一个线性系统或线性元件, 它的输入和输出之间是成正比的, 如果有几个输入, 则输出与这几个电压之和成正比。非线性度就是偏离正比关系的度

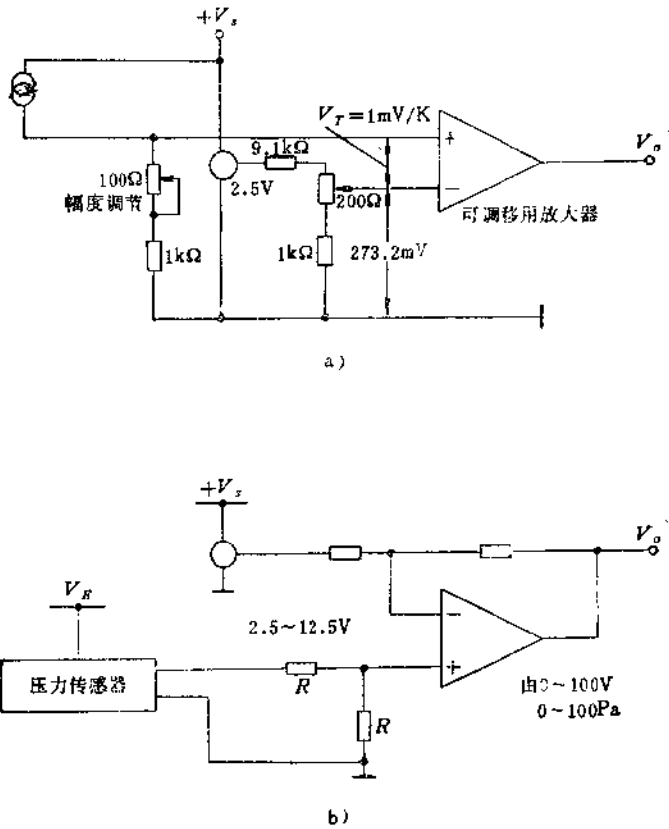


图1-3-68 量程偏置

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

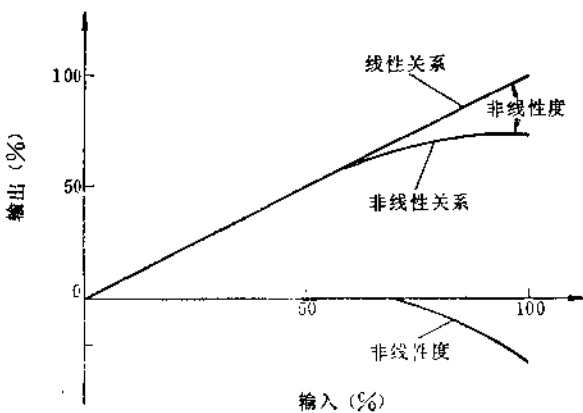


图1-3-69 典型的非线性关系

量。图1-3 69为输入与输出间呈现理想线性关系和非线性关系，同时表示这两者之间的差值（即非线性度）。

所有的元器件、传感器都用非线性度表示其特

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。再就是元器件和元器件之间的差异而影响到其性能，只能承认最坏情况作为其技术指标，例如，通常用最佳直线的最大偏差表示。

大多数传感器的输入-输出特性都是非线性的。如果不考虑传感器的迟滞和蠕变效应，一般可用一单调非线性函数，即

$$y = \tilde{f}(x) \quad (1-3-70)$$

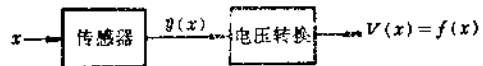


图1-3-70 非电量转换成电量框图

来表示它的输入-输出特性, 式中 x 为输入物理量, y 为输出物理量。在电测量中, 输出量 $y(x)$ 或者是电参数 (电阻、电容、电感等), 或者是电量 (电动势、电荷等)。我们可以利用适当的变换电路, 把 $y(x)$ 量转变成电压量或电动势量, 如图1-3-70所示。把电压量作为输出量得

$$V(x) = f(x) \quad (1-3-71)$$

一般说来, $V(x)$ 也是一单调非线性函数。对于这类函数, 可以首先用折线分段逼近复现, 如图1-3-71曲线①所示, 然后对折线进行校正得如图1-3-71曲线②所示的直线。折线电路如图1-3-72所示, 每段折线利用一个运算放大器电路 A_1 来实现, 运算放大器 A_0 电路是校正电路。

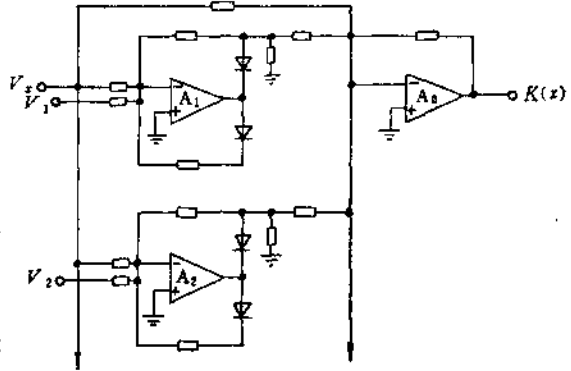


图1-3-72 折线电路

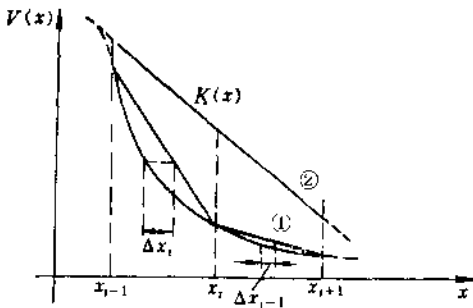


图1-3-71 折线逼近曲线图

假定被测物理量 $x \in [x_0, x_m]$, 折线的转折点 x_1, x_2, \dots, x_{m-1} 按顺序分别落在 $[x_0, x_m]$ 之间。由于 $\mu = f(x)$ 在 $[x_0, x_m]$ 中各段 (按 $[x_0, x_1], [x_1, x_2], \dots, [x_{i-1}, x_i], \dots, [x_{m-1}, x_m]$ 分段) 的非线性程度是不一致的, 显然 $[x_0, x_1], [x_1, x_2], \dots, [x_{m-1}, x_m]$ 各段不能等距分布, 否则各段的折线误差 (如图1-3-71中 $\Delta x_i, \Delta x_{i-1}$) 将差别很大。因此, 这里存在如何合理选择 x_1, x_2, \dots, x_{m-1} 位置的问题。显然, 选的折点越多, 非线性误差越小, 但折线电路及调试会越复杂。在工程设计中, 一般选的折点数是一定的。那么怎样在折点数一定的条件下, 使非线性误差达到最小就是本节所要解决的问题, 即优化设计问题。对于优化问题的提出和求解如图1-3-73所示, 画出了 $[x_{i-1}, x_i]$ 区间分段的示意图。从该图可以想象, 为了使 $V(x)$ 曲线与 $K_i(x)$ 曲线尽量接近, 两曲线间的面积 (图示阴影部分) 要尽量小, 即折线误差尽量小。最优问题就是在约束

$$x_0 \leq x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{m-1} \leq x_m \quad (1-3-72)$$

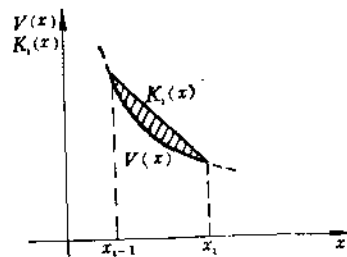


图1-3-73 分段示意图

的条件下, 求目标函数

$$J_0(x_1, x_2, \dots, x_{m-1}) = \sum_{i=1}^m J_i(x_{i-1}, x_i, x) \\ = \sum_{i=1}^m \int_{x_{i-1}}^{x_i} |V(x) - K_i(x_{i-1}, x_i, x)| dx \quad (1-3-73)$$

为最小时的 x_1, x_2, \dots, x_{m-1} 值。其中 x_0, x_m 是已知的, $J_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为图1-3-73所示阴影面积, J_0 是各段折线与 $\mu(x)$ 曲线之间的面积和。式(1-3-73)中 K_i 为

$$K_i(x_{i-1}, x_i, x) \\ = V(x_{i-1}) + \frac{V(x_i) - V(x_{i-1})}{x_i - x_{i-1}} (x - x_{i-1}) \quad (1-3-74)$$

后面我们将会看到, 对积分区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 各段要求逼近的程度是不一致的。为此, 我们通过对各段目标函数 J_i 施加权因子, 即如下式所示。

$$J(x_1, x_2, \dots, x_{m-1}) = \sum_{i=1}^m W_i J_i = \min \quad (1-3-75)$$

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 $x_j^{(j)} = x_j^{(i)}$ ，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)解的基本步骤如下：

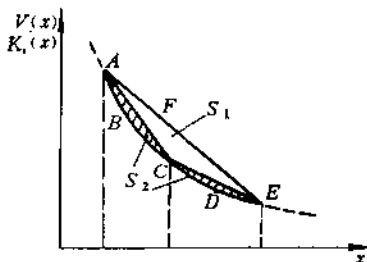


图1-3-74 分段与误差的关系

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 $i = 0, x_1 = x^{(0)}$;
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 $J(x^{(i)} + t_i^*P^{(i)}) = \min J(x^{(i)} + tP^{(i)})$;
6. 求 $x^{(i)} = x^{(i)} + t_i^*P^{(i)}$;

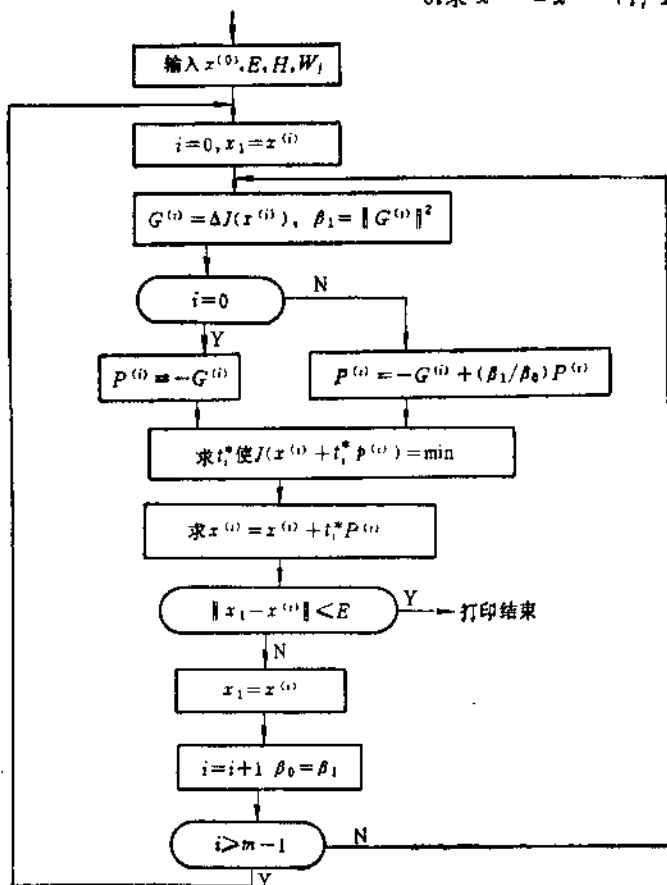


图1-3-75 计算流程图