

高等学校试用教材

精密仪器电路

天津大学 张国雄 主编
上海交通大学 沈生培

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

前 言

本教材是根据1983年9月在长春召开的全国高等工业学校仪器仪表专业教材编审委员会制订的教学计划和1984年4月在天津召开的精密仪器专业教材编审小组会确定的教学大纲编写的。

近年来,精密仪器朝着光、机、电、算结合的方向迅速发展。可以这样说,任何一台现代精密仪器都离不开电路。为了突出仪器电路的共性,设置了“精密仪器电路”这门课程。本课程着重介绍几何量与机械量测量仪器中的信号放大、信号调制解调、信号分离、信号变换及运算电路。全书共分十二章。第一章介绍精密仪器电路的功用与组成,第二章介绍仅用放大器的特点与设计方法,第三章介绍各种信号调制方式及解调电路,第四章阐述信号分离电路的工作原理与快速设计方法,第五章介绍模拟式信号运算电路,第六章为数模与模数转换电路,第七、八两章阐述数字信号的细分、辨向、当量变换以及一些特殊的计数电路设计方法,第九章介绍仪器特性线性化、量程自动转换、调零、定标电路,第十章阐述对仪器电源的主要要求与设计方法,第十一章介绍仪器的抗干扰技术,最后第十二章通过对四个典型仪器的实际电路解剖,使读者更好地了解上述功能电路的作用与互相联系。编写中除讲清概念、原理外,还力求结合实际,介绍了一些常用集成单元电路与设计计算方法。针对精密仪器电路的特点,全书着重从精度要求对电路进行了分析。

本书可作为高等学校精密仪器专业学生的试用教材,亦可供其它有关专业师生和有关工程技术人员参考。

本书由天津大学张国雄教授和上海交通大学沈生培副教授担任主编。各章编者如下:第一、三、五、八、十二章张国雄,第二、六、九章沈生培,第四章及十二章第三节清华大学雷宝振老师,第七章成都科技大学张渡教授,第十、十一章南京工学院陶人仪老师。

本书由哈尔滨工业大学强锡富教授担任主审。为了更好、更广泛地听取意见,1986年8月在上海对本书初稿进行了试讲,有十多个兄弟院校和单位的老师与有关人员参加了讲习班与审稿会。主审及与会同志对全书提出了许多宝贵的意见与建议。编者对他们表示衷心地感谢。

由于我们的水平有限,实践经验又少,加之电路发展迅速,我们搜集到的资料很快又落后于现实,不当之处与错误在所难免,恳请读者不吝赐教,对本书提出宝贵意见。

编者

1987年8月

4
5
6

目 录

第一章 概论	1	(三) 高共模抑制比的差动放大器	42
§ 1-1 精密仪器电路的内容与功用	1	(四) 电桥放大器	42
一、课程的内容	1	(五) 低漂移放大器	44
二、精密仪器电路的主要功用	1	(六) 微电流放大器	46
§ 1-2 对仪器电路的主要要求	2	第三章 调制与解调电路	49
§ 1-3 仪器电路的输入信号	5	§ 3-1 概述	49
一、模拟式信号	5	§ 3-2 调幅式测量电路	50
二、数字式信号	6	一、调幅原理	50
§ 1-4 仪器电路的类型与组成	8	(一) 相乘型调幅方法	50
一、模拟式电路的基本组成	8	(二) 相加型调幅方法	51
二、数字式电路的基本组成	9	二、包络检波电路	52
§ 1-5 仪器电路的发展趋势	10	三、相加型相敏检波电路	56
§ 1-6 课程的性质与学习方法	11	(一) 半波相敏检波电路	57
第二章 信号放大器	13	(二) 全波相敏检波电路	59
§ 2-1 噪声的基础知识	13	(三) 电路参数选择	60
一、噪声的种类与性质	13	(四) 相敏检波器的鉴相与选频特性	62
二、处理放大器噪声的方法	14	四、相乘型和开关型相敏检波电路	64
(一) 等效输入噪声	14	(一) 开关式方波相乘相敏检波器	64
(二) 噪声系数	15	(二) 差分式相敏检波电路	66
(三) 最小噪声系数和最佳源电阻	15	(三) 脉冲控制记忆式相敏检波电路	69
§ 2-2 分立元件式信号放大器设计	16	五、相敏检波器的应用	69
一、概述	16	六、载波频率的选取	71
二、信号放大器设计	18	§ 3-3 调频式测量电路	72
(一) 直接耦合的放大器	18	一、调频原理与方法	72
(二) 变压器耦合的放大器	20	二、解调电路	75
(三) RC 耦合的放大器	20	三、应用举例	81
§ 2-3 运放式信号放大器设计	30	§ 3-4 调制式测量电路	81
一、运算放大器的误差及其补偿	30	一、调制的原理与方法	81
(一) 实际运算放大器及其特性	30	二、鉴相电路	84
(二) 失调及其补偿	30	§ 3-5 脉冲调制式测量电路	87
二、典型放大器的设计	35	一、脉冲调制原理	87
(一) 反相放大器	35	二、脉冲调制信号的解调	90
(二) 同相放大器	35	三、应用举例	91
(三) 交流放大器	37	§ 3-6 锁相环路	92
三、差动放大器	39	一、基本概念	92
(一) 差动放大器的原理	39	(一) 组成与功用	92
(二) 增益调整电路	40	(二) 环路模型与传递函数	92

二、一阶环路的工作过程.....94	二、变型跟踪滤波器.....131
(一) 一阶环路的相角与捕捉过程.....94	§ 4-6 谐波分解电路.....132
(二) 频率牵引.....95	附录 A、B.....134
三、环路的性能分析.....96	第五章 运算电路137
(一) 稳态误差.....96	§ 5-1 概述.....137
(二) 捕捉带.....98	§ 5-2 线性加减运算电路.....138
(三) 暂态误差与噪声对环路的影响.....98	一、工作原理.....138
(四) 环路的稳定性.....99	二、运算误差.....139
四、锁相环路应用举例.....99	§ 5-3 乘除及对数、指数运算电路.....144
五、数字锁相环.....101	一、对数运算电路.....144
第四章 信号分离电路103	二、指数运算电路.....147
§ 4-1 概述.....103	三、乘除和乘方、开方运算电路.....148
§ 4-2 模拟滤波器基本知识.....103	(一) 对数式乘除运算电路.....148
一、滤波器的类型、特性及基本知识.....103	(二) 跨导乘法器.....149
二、二阶有源滤波器与 n 阶有源滤波器 之间的关系.....105	(三) 参差控制式乘除运算电路.....150
三、有源滤波器的传递函数.....106	(四) 其它原理的乘除、平方、开方电 路.....150
§ 4-3 RC二阶有源滤波器的基本组成方 法.....112	§ 5-4 微分和积分运算电路.....152
一、有限电压源法.....112	一、积分电路.....152
二、无限增益多路反馈方法.....113	(一) 工作原理.....152
§ 4-4 RC有源滤波器的设计.....114	(二) 运算误差.....152
一、滤波器设计应注意的几个问题.....114	(三) 具有特殊性能的积分电路.....155
二、RC有源低通滤波器的快速设计方 法.....117	二、微分电路.....158
(一) 压控电压源型低通滤波器的设计.....117	§ 5-5 绝对值、平均值、峰值、有效值 运算电路.....159
(二) 无限增益多路反馈低通滤波器的 设计.....119	一、绝对值运算电路.....159
(三) 双二次型低通滤波器的设计.....119	二、平均值运算电路.....159
三、RC有源高通滤波器的设计.....121	三、峰值运算电路.....160
(一) 压控电压源高通滤波器.....121	四、有效值运算电路.....164
(二) 无限增益多路反馈高通滤波器.....122	§ 5-6 复杂运算电路.....165
(三) 双二次高通滤波器.....123	一、函数转换电路.....166
四、模拟带通滤波器的设计.....124	二、求反函数的方法.....169
(一) 压控电压源二阶带通滤波器.....125	三、解微分方程.....170
(二) 无限增益多路反馈带通滤波器.....126	第六章 数模与模数转换电路173
(三) 双二次带通滤波器.....127	§ 6-1 模拟信号的数字化.....173
五、模拟带阻滤波器的设计.....128	一、采样定理.....173
(一) 压控电压源带阻滤波器.....129	二、信号的量化.....174
(二) 双二次带阻滤波器.....129	§ 6-2 采样保持电路.....175
§ 4-5 跟踪滤波器.....130	一、采样保持电路的原理.....175
一、压控跟踪滤波器.....130	二、附加缓冲放大器.....176
	三、减小漏电流产生的误差.....176
	§ 6-3 数模转换器.....178

一、电阻网络 D/A 转换器	178	一、分频器与倍频器	244
(一) 电压相加型	178	二、乘法器	246
(二) 电流相加型	180	三、脉冲定时电路	249
二、梯形电阻网络 D/A 转换器	180	四、乘系数电路	251
三、实际 D/A 转换器	181	五、计算机接口	256
(一) 典型单片集成 D/A 转换器	182	§ 8-3 计数电路	256
(二) 双极性输出的 D/A 转换器	183	一、计数器的类型与选用	256
四、D/A 转换器与微处理器接口	184	二、任意进制计数器的构成	259
§ 6-4 模数转换器	182	第九章 线性化、量程自动转换、调零及定标电路	263
一、A/D 转换器的原理	188	§ 9-1 线性化电路	263
(一) 单积分式 A/D 转换器	188	一、折线逼近法	263
(二) 双积分式 A/D 转换器	189	(一) 串联法	263
(三) 电压-频率变换式 A/D 转换器	191	(二) 非线性反馈法	265
(四) 逐次比较式 A/D 转换器	192	二、多项式逼近法	268
(五) 跟踪比较式 A/D 转换器	193	(一) 并联法	268
(六) 直接比较式 A/D 转换器	194	(二) 串联法	269
二、实际 A/D 转换器	196	三、用微处理器线性化原理	270
(一) 逐次比较式 A/D 转换器	196	§ 9-2 自动调零与定标电路	272
(二) 双积分型实际 A/D 转换器	197	一、自动调零电路	272
三、A/D 转换器与 CPU 的接口	202	二、自动定标电路	273
四、用软件方法实现 A/D 转换	203	§ 9-3 量程自动转换	274
(一) 逐次比较式 A/D 转换	203	一、量程自动转换的原理	274
(二) 双积分式 A/D 转换	205	二、模拟比较法自动转换电路	275
第七章 细分与辨向电路	206	三、数字判别法转换电路	278
§ 7-1 直传式细分电路	206	四、微处理器控制的量程自动转换	279
一、位置直接细分	207	第十章 直流电源稳定技术	280
二、电阻链分相细分	208	§ 10-1 概论	280
三、电平初细分	212	§ 10-2 稳定电源可平原理	281
四、门电路细分	214	一、稳定电源的稳压方式	281
五、脉冲填充法细分	216	二、源效应与负载效应	281
§ 7-2 平衡补偿式细分电路	218	§ 10-3 高性能磁芯的获得	284
一、相位跟踪细分	219	§ 10-4 基准电源	285
二、幅值跟踪细分	223	一、干电池与标准电池	285
三、脉冲宽度型幅值跟踪细分	227	二、硅稳压管	286
四、脉冲跟踪细分——锁相倍频细分	234	三、稳压场效应管	236
五、微型计算机细分	236	四、集成带隙基准源	236
§ 7-3 辨向电路	238	§ 10-5 晶体管精密稳压电源	287
一、辨向电路举例	238	一、晶体管精密稳压电源的特点	288
二、符号显示和加液计数控制电路	241	二、晶体管精密稳压电源举例	288
第八章 脉冲当量变换与计数电路	243	§ 10-6 运算放大器型稳压电源	290
§ 8-1 脉冲当量变换电路的功用	243	一、运算放大器型稳压电源的特点	290
§ 8-2 脉冲当量变换的常用电路	244		

二、运算放大器稳定电源举例	290	五、 $\Delta\alpha$ 与 λ_0 计算电路	326
§ 10-7 集成稳压器	292	(一) $\Delta\alpha$ 计算电路	324
一、集成稳压器优点	292	(二) λ_0 计算电路	324
二、集成稳压器稳定电源举例	293	六、 R_z 、 R_p 、 R_y 计算电路	326
第十一章 抗干扰技术	296	(一) 基本原理	326
§ 11-1 干扰与抑制	296	(二) 峰(谷)值分隔电路	327
一、干扰与噪声	296	(三) 最大五峰(谷)选择电路	327
二、噪声源	296	七、HSC 与 I_p 计算电路	329
三、噪声耦合方式	297	八、微型计算机的应用	330
四、干扰形态	299	§ 12-2 传动链测试仪	331
§ 11-2 接地技术	301	一、工作原理	332
一、精密仪器的接地系统	301	二、光电转换与放大电路	334
二、精密仪器的接地系统	301	三、开门与关门脉冲形成电路	333
三、精密仪器的接地方式	302	四、相位计	337
四、印刷电路板接线的合理布置	307	五、数模转换电路	339
§ 11-3 屏蔽技术	307	§ 12-3 频谱分析仪	340
一、屏蔽的意义	308	一、模拟式频谱分析仪的工作原理	340
二、屏蔽的原理	308	(一) 顺序滤波法	341
三、屏蔽结构形式与材料	311	(二) 并行滤波法	341
§ 11-4 其它抗干扰方法	312	(三) 扫描滤波法	342
一、平衡技术	312	(四) 外差法	342
二、隔离技术	313	(五) 时间压缩法	342
三、去耦与滤波	315	二、外差式频谱分析仪典型电路分析	344
四、电路的合理布局	315	(一) 原理框图	344
第十二章 典型仪器电路分析	317	(二) 电路原理	344
§ 12-1 轮廓仪	317	三、频谱分析仪的应用	350
一、工件表面粗糙度及其表征参数	317	§ 12-4 激光干涉仪	351
二、泰勒塞夫 5 型轮廓仪的组成	320	一、双频激光干涉仪的工作原理	351
三、电容放大电路	322	二、相减电路	353
四、R ₀ 计算电路	324	三、脉冲当量变换电路	354

第一章 概 论

§ 1-1 精密仪器电路的内容与功用

一、课程的内容

本课程中精密仪器主要指几何量与机械量的精密计量仪器。几何量包括长度、角度、几何形状、波度、粗糙度等。机械量包括速度、加速度、弹性、硬度、重量、力、力矩、振动参数、压力、流量、温度等等。

随着科技的发展,对测量精度、效率、自动化的程度要求越来越高。利用电学方法的几何量与机械量测量仪器日益增多。凡是把被测参数或其变化,直接或间接地转换成电信号,再经电子线路进行放大、细分、信号选取、运算、变换等处理后推动显示或执行机构,完成测量或控制任务的都称为电测量仪。

这里要强调的是将测量信号转换为电信号的仪器,而不是仅仅在照明、驱动等方面采用电气的仪器,称之为电测量仪。因此本课程讲授的精密仪器电路也主要是介绍将传感器输出的测量信号放大、细分、进行选取、运算、变换等处理的电路。只有经过电路的放大、细分、选取、运算、变换等处理,才能将传感器输出中的有用信号、无用信号、代表不同测量信息的各种信号分开,将微弱信号放大、鉴别被测信号的微小变化,经过运算处理得到被测量的各种所需表征参数,驱动显示或控制执行机构动作。因此电路在仪器中担负着:选择、放大、测微、运算、信号变换、逻辑处理等任务,是电测量仪必不可少的组成部分。本课程主要研究这些功能电路及其在仪器中的相互联系、作用。

二、精密仪器电路的主要功用

电测量仪的主要优点可归结为:1) 精度高;2) 使用方便;3) 易于自动化。这在很大程度上都是通过仪器电路实现的。

电测量仪的精度高主要由于:1) 易于实现高倍率的放大。电路的放大倍数可以做到几万倍、几十万倍。而一般光学和机械放大倍数不易做得很大。从而提高了电测量仪的分辨率,减小了读数误差;2) 通过电路,易于实现量程切换,特别在数字式仪器中有效数字的位数可以很多,解决了量程与分辨率的矛盾,即在大量程下仍有较高的分辨率;3) 通过信号的调制与解调电路、选频与滤波电路、共模抑制电路等等,可以比较方便地选取有用信号,抑制无用信号,从而减小噪声、干扰与非被测参数的影响;4) 利用电路可以对仪器误差进行自动修正,包括零点的自动校正、放大倍数的自动校正和非线性误差的修正等等。负反馈电路在很多情况下也起到这类作用。近年来,还广泛应用计算机软件修正;5) 利用差动电路、补偿电路、平衡电路使很多干扰因素的影响互相抵消或显著减小。

仪器电路的上述功用使它不仅广泛地用于各种纯电测量仪,也广泛应用于其它类型,例如光学仪器中。为此,先将光学信号,例如干涉条纹或莫尔条纹信号,经光电转换为电信号。然后通过仪器电路,使很多误差因素得以减小。

测量仪器使用方便表现在许多方面，它们也是与电路的功能分不开的。例如：1) 通过电路可以方便地将信号传输到所需地点，使它便于读出，或实现控制、执行；2) 电路放大倍数可以很高，可以不需要仔细瞄准、精心估读，数字式电路读数更为方便；3) 电路的响应速度高，信息传输快，利用信号锁存，便于实现动态采样；4) 通过电路可进行巡回采样，或同时读出多路信号；5) 通过信号分离电路，可以读出各种成分参数，例如读出各次谐波分量；6) 通过计算电路与逻辑处理电路便于实现信号的运算处理，直接读出所需的复杂参数值，例如表面粗糙度测量中的算术平均偏差 R_a 值；7) 便于利用电路储存测量结果。

自动化功能也是与电路分不开的。通过电路实现逻辑判断、处理，功率放大、反馈控制等等。

电子计算机的广泛应用是仪器电路功能的延伸与新的发展。其主要功用为：1) 大量数据的动态和自动采样；2) 大量数据的储存；3) 完成较为复杂多样的运算；4) 较为复杂的误差自动修正；5) 较高水平的智能化。计算机完成这些任务都需要仪器电路对信号进行预处理，并通过接口电路将计算机与仪器沟通。

§ 1-2 对仪器电路的主要要求

对精密仪器电路的要求，首先是围绕一个“精”字提出来的，当然也还有其它一些要求。

1. 信号选取与抗干扰能力

仪器电路接受传感器送来的信号不仅有反映被测参数情况的测量信号，而且会有器件内部产生和外界干扰引起的噪声，还有一些其它伴随的信号。

在精密测量中，由传感器送来的信号往往是很微弱的，有时达微伏级。为了保证高的测量精度，首先要求电路本身是低噪声的，这里包括选择低噪声的器件，合理选择参数等。其次是采取恰当的抗干扰措施，这里包括适当的屏蔽、隔离，合理的布线与接地，还包括电路本身的合理设计。这些问题对电路的前级尤为重要，因为它们带来的影响最大。被测信号的调制和解调是增强仪器电路选取信号、排除干扰重要和常用的措施之一。

前面提到，由传感器送来的信号中还会有一些伴随的信号，这主要是指从整个测量过程来看是需要的，但并非表征被测参数的那些。例如在振幅测量中谐振中心的位置，在工件圆度测量中工件的直径值等等。这时要求电路有较强的共模抑制能力，仅仅将表征振幅的振点位置最大变化量或表征圆度的工件直径最大差值选取出。

在一定意义上说，在信号调制的情况下，载波信号本身也是伴随信号。在需要分别测定振动或回转系统各次谐波分量的情况下，其它谐波的信号对特定的待测谐波来说，也是伴随信号，电路应有能力将它们分清，否则也会带来测量误差。

2. 稳定性

稳定性是对仪器电路乃至整个测量仪器最基本的要求。稳定性不好就很难提出对其它指标，如线性度、频率特性的高要求。这就决定了要把仪器或电路的稳定性作为首要指标。

稳定性可以分为温漂、长期稳定性与短期稳定性。短期稳定性表现为示值重复性。电路的短期稳定性主要由输入信号的信噪比，电路本身的噪声、抗干扰性能决定。器件本身的性

能, 寄生参数的稳定性, 焊接的质量, 接插件和开关的过渡电阻稳定性、接触可靠性, 电源电压的波动, 外界电磁场的干扰, 环境条件的快速变化都是短期稳定性不好的重要原因。温漂导致仪器的示值在一次运行中发生渐变。长期稳定性由元器件老化、接插件弹性疲劳、氧化等引起, 使仪器性能在长期运行中发生变化。

电路的稳定性不仅包括零点和放大倍数(灵敏度)稳定性, 还应包括线性度、频率特性、输入输出阻抗的稳定性等等。

为了提高仪器电路的短期稳定性, 除了选用低噪声、工作性能稳定可靠的元器件、适当布线接地、采取适宜的抗干措施外, 还常采用深度的负反馈, 采用差动或平衡电路、零位测量法等。在静态测量条件下, 采用多次采样取平均值, 加大滤波器时间常数等也能减小示值分散性。但它不适用于动态和快速测量。

为了减小电路温漂带来的误差, 除采用漂移小、经过老化处理的元器件外, 还要合理安排热源, 采取深度负反馈和补偿措施。不少仪器中还设有自动稳零和自动定标或放大校正电路。有的仪器在使用中规定了对环境和预热的要求。这些措施对提高长期稳定性也有用。

3. 频率特性与响应速度

由于被测对象不同以及仪器的工作原理不同, 对仪器电路的频率特性要求各不相同。从被测参数的频率范围看, 低端从直流开始, 高端可至 10^{11} Hz, 以至更高。在机械振动测试中, 例如为了测定一些高频振动和高速回转轴系的高次谐波(例如 1500 次谐波), 被测信号的频率可达 10^7 Hz 以上。在采用信号调制的情况, 载波频率比待测信号的频率至少还要高一个数量级。

从对频率特性的要求看, 有的仪器需要宽频带, 因为只有这样才能使不同频率的信号具有同样的灵敏度, 才能使被记录的振动、过渡过程或轮廓波形不失真。有时要求电路有选频特性, 只让载波频率以及由于调制信号的加入而产生的边频信号通过, 从而使它具有抗干扰能力。有的电路又要求有抑制一定频率信号的能力, 例如在解调后常需抑制载波频率或二倍载波频率的信号。总之, 仪器电路要求在很大一个频率范围内有选通一定频率范围内信号、抑制另一频率范围内的完善性能。对于视听设备, 在通带内衰减几个分贝一般是允许的。但对测量仪器, 在被测信号频率范围内衰减 1% 往往已是不能允许的误差。对于应予抑制的信号, 情况也类似。

随着科技的发展, 对于快速变化的过程进行动态测量的要求越来越多, 越来越高。在对若干参数进行巡回采样的情况下, 巡回点数越多, 越发要求提高采样速度。一些本来可以静态测量的参数, 为提高效率, 也常采用动态测量。这就要求仪器电路的各个元器件(如光电元件、放大器件), 各个功能块(如细分电路、计数器、逻辑电路), 各个闭环跟踪系统, 有较高的响应速度。特别是闭环跟踪系统, 往往是影响仪器动态特性的关键部件。

4. 线性与保真度

线性度是仪器精度的又一重要指标。从原理上讲, 仪器的输入(被测量)与输出(示值)可以按非线性函数关系定标。这时传递函数的非线性并不影响仪器的精度。但是, 通常仍然要求仪器的输入与输出之间具有线性关系, 这是因为: 1) 线性标尺便于读出; 2) 在换挡时只是改变分度值, 不必另行定标; 3) 记录曲线波形不失真; 4) 进行模数转换、细分、**控制跟踪伺服系统时均不必考虑非线性因素, 比较方便。**

电测量仪的非线性可能由于传感器或电路的非线性所引起, 有时也还可能由显示执行机

构(例如记录仪、荧光屏)的非线性所引起。选择适当原理的测量电路,往往对仪器的线性度有很大影响。例如,电容传感器的输出可以利用测量电容量 C 的电路、测量容抗 $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$ (ω 为供电角频率)、或测量谐振频率 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ (L 为谐振线圈电感量)来进行变换。

根据被测量值 P 及所用的传感器类型,选择适当的测量电路,可以显著地减小非线性误差。

仅用放大器要适当安排静态工作点、动态工作范围,尽可能减小由放大器带来的非线性失真。差动接法、负反馈常是减小非线性失真的有效办法。有的解调电路,从原理上讲就具有非线性(例如由于检波二极管的非线性所引起),需要采用非线性校正电路,进行校正。采用实现零位测量的闭环系统,可以避免许多中间环节的非线性影响,也是保证线性度的一种有效方法。

电测量仪的非线性度可能由传感器、电路、显示执行机构这三个部分的非线性度产生。在这三部分中间,电路是最灵活的,它有时还要担负补偿其它二部分非线性失真的任务。利用计算机软件进行非线性校正,近年来在一些精密计量仪器中正获得越来越广泛的应用。

保真度是从视听设备中借用过来的一个概念。它要求测试记录下来的数据、图形保持被测量原貌。因为被测量不仅在数量上的变化,而且这些数量可能以不同的频率变化,这就是说它有不同频谱的成分。为了保证测量数据、记录图形反映被测量原貌,不仅要求仪器的非线性失真小,而且要求它由幅频特性、相频特性带来的失真小。同样,传感器、电路、显示执行机构都可能有由于频率特性而带来的失真。对于仪器电路,不仅要求它本身不带来频率失真,还有补偿其它部分引起的频率失真的功能。

5. 量程与分辨率

为了仪器使用方便、增强其通用性往往要求它有较大的量程。对于模拟式电测量仪,送到显示执行机构的电表与被测量成正比的仪器,量程除受传感器的线性范围限制外,还往往受放大器的动态工作范围所限制。在放大器的动态工作范围相同情况下,放大器的放大倍数越大,仪器的分辨率越高,而仪器的量程则越小。为了解决这一矛盾,通常要求仪器设有量程变换电路。在大量程时,将由传感器输入的信号衰减,使电路仍工作在线性范围内。有些仪器设有量程自动切换电路,能根据被测量大小自动选择最佳量程。

在以模拟式仪器为基础,增加模数转换构成的数字式量仪中,量程仍主要由放大器动态范围决定。切换量程时需同时改变小数点位置或单位,以获对应量值。

在长度、角度和时间测量中,常采用增量码传感器,它输出周期变化的电信号,变化的周期数与被测量成正比。这类仪器中只要增加计数器位数即可,量程由传感器和机械结构决定。

有一类按上述周期变化信号的相位差变化来进行测量的仪器,其量程被限制在相位差不能超过 $\pm 180^\circ$ (或 $\pm 90^\circ$)范围内。为适应不同量程的需要,也设量程变换电路,以改变 180° 相位差所对应的被测量值。这时,量程变换常通过将二路比相信号同时分频来实现。

适当提高仪器的分辨率有利于减小读数误差、方便读数。在模拟式仪器中为了提高仪器的分辨率应当提高放大器放大倍数。在数字式仪器中,当被测量的变化不到数字显示最低位一个字时,示值不会改变,这一误差称为量化误差。为了减小量化误差必须减小每一个字所对应的被测量。为此常常采用细分电路,在传感器输出信号的一个周期内进行内插,以减小每一个计数脉冲所对应的当量。

仪器分辨率的提高受到示值短期稳定性的限制。当示值不稳定性大于分辨率时引起指针晃动, 字码来回跳动, 不便读数。

6. 输入与输出阻抗

对仪器电路的输入阻抗要求随所用传感器而异。有的传感器(例如压电传感器)输出阻抗很大, 可达 $10^8 \Omega$ 以上, 这就要求仪器电路有很高的输入阻抗, 为此放大器的输入级常常采用有高输入阻抗的场效应管, 采用自举电路, 有些情况下还需采用电荷放大器。但是并不是在所有情况下都要求输入端有高输入阻抗。输入阻抗越高, 输入端的噪声也越大。合理的要求是输入级的输入阻抗应与传感器输出阻抗匹配, 使放大器的输出信噪比达到最大值。

同样要求电路的输出阻抗应与它所驱动的显示执行机构阻抗匹配。

7. 计算与逻辑控制功能

通常, 电测量仪需要完成一定的计算, 以获得所需的被测参数值。此外, 仪器电路还要完成一系列的逻辑判断处理, 以保证仪器正常运转工作。近年来, 这些任务已越来越多地由电子计算机完成。

最后指出, 精密仪器电路也不是在一切方面比其它电路(如拖动电路)有更高的要求。例如在能量的转换效率上, 对仪器电路要求就不高。

§ 1-3 仪器电路的输入信号

仪器电路的输入信号是由传感器送来的。随着传感器类型的不同, 输入信号的形式也能随之而异。输入信号的形式对电路的组成与要求有很大影响。常见的为以下各种信号:

一、模拟式信号

1. 非调制信号

非调制信号是指传感器的输出为与输入被测量相对应的信号。在传感器具有线性特性、输入信号在传感器通频带范围内时, 传感器的输出信号 2 与被测量 1 波形相似, 如图 1-1 所示。利用压电传感器测工件表面粗糙度或力(图 b), 利用磁电式传感器测量速度(图 c), 利用热电偶测温等都属于这一类型。

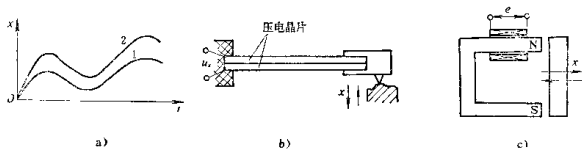


图1-1 非调制模拟信号

a) 波形图 b) 压电传感器 c) 磁电传感器

总的来说, 采用无源传感器(或称发电型传感器), 即输出信号的能量全部由输入信号提供时, 或者采用有源传感器, 但传感器由直流电源供电, 如直流供电的电阻式传感器, 常常输出非调制信号。非调制信号不需解调, 电路简单, 但抗干扰性能较差。

2. 调幅信号

调幅就是用调制信号 x (这里是被测过) 去控制高频振荡的振幅, 使高频振荡的振幅按调制信号的规律变化, 如图 1-2 所示。高频振荡称为载波, 也可称为被调制信号。

利用电感传感器测量工件的轮廓或振动时 (图 1-3), 传感器的供电电压为载波信号, 传感器的输出为调幅信号。电容、互感等传感器也常输出调幅信号。也可在电路中进行幅值调制。

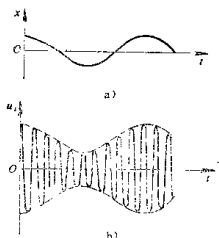


图 1-2 调幅信号波形

a) 调制信号 b) 调幅信号 (已调波)

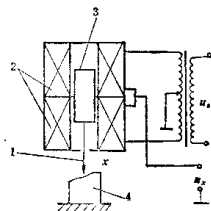


图 1-3 用电感传感器测量工件轮廓

1—测杆 2—线圈 3—磁芯 4—被测件

3. 调频信号

调频是用调制信号 (被测量) 去控制高频振荡 (载波) 的频率。其波形如图 1-4 所示。

图 1-5 所示是测量力或压力的振弦式传感器。振弦 3 的一端与支承 4 相连, 另一端与膜片 1 相连接, 振弦 3 的固有频率随张力 T 变化。振弦 3 在磁场 2 内振动时产生感应电势, 其输出信号为调频信号。

如果把电感传感器的线圈或电容传感器的电容接入振荡器内, 那么振荡器输出调频信号。这里常用单边式电感或电容传感器。

4. 调相信号

调相是用调制信号 (被测量) 去控制高频振荡 (载波) 的相位。

图 1-6 是获取调相测量信号的实例。图中弹性轴 1 上有两个完全相同的齿轮 2。轴 1 转动时, 在感应式传感器中产生感应电势。当有扭矩作用在弹性轴 1 上, 轴 1 产生扭转角, 两个齿轮的相对位置发生变化。如果左边的齿轮匀速转动, 那么传感器 4 输出调相信号。根据传感器 3 和 4 输出的感应电势相位差可以测量施加在轴 1 上的扭矩。

二、数字式信号

1. 增量码信号

在图 1-7 所示激光干涉仪中, 激光器 1 发出的光束由分光镜 3 分成两路, 一路由参考反射镜 2 反射返回, 另一路由测量反射镜 4 反射返回, 在分光镜 3 处重新汇合, 形成干涉。工作台 5 和安装在工作台上的测量反射镜 4 每移动 $\lambda/2$, 干涉条纹亮暗变化一个周期, 光电元件 6 的输出变化一个周期, 这里 λ 是激光的波长。光电元件 6 输出信号的周期数与工作台 5 的位移成正比。这种信号称为增量码信号。

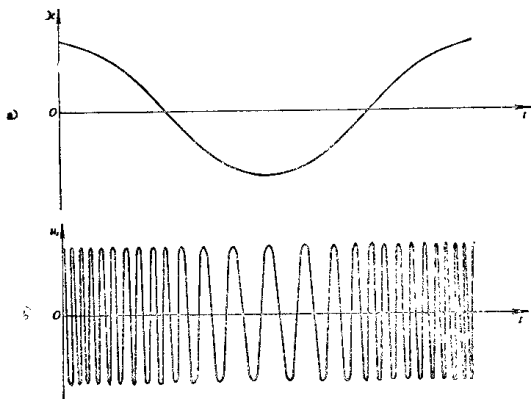


图1-4 调频信号的波形

a) 调制信号 b) 调频波(已调波)

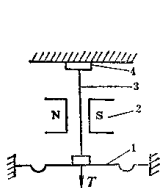


图1-5 振弦式传感器

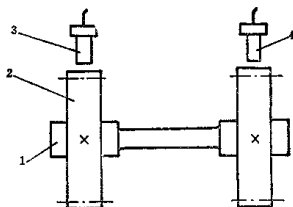


图1-6 感应式扭矩传感器

光电元件6的输出在一个周期内是模拟信号，很多仪器中还对此类模拟信号进行运算，以实现细分。它与图1-1 a所示非调制信号的区别是，光电元件的输出电量不与被测量成正比，而是输出的周期数，或相位角变化，与被测量成正比。它与调相的区别是，在图1-6中，当轴1上没有转矩作用时传感器仍有交变信号输出，信号的相位仍在不断变化，它与另一取作参考信号的相位差表示输出量的大小。而在图1-7所示增量码仪器中，输入量（反射镜4的位移）停止变化时，输出相位停止变化。它是按测量过程中相位的总变化量来计算量值的。

增量码信号在一个周期内具有模拟信号的特征，但从整体来说，它依据信号变化的周期数或相位变化增量来计算量值，并且用数字技术进行信号处理，因此将它列为数字式信号。

光栅、感应同步器、磁栅、石英振荡器（测时段用）也常输出增量码信号。为了提高增量码信号的抗干扰能力，为了便于细分，也常对增量码信号进行调制，这将在以后讨论。

2. 绝对码信号

绝对码信号的特点是被测量一定量值对应于一定的编码。例如采用图1-8所示码盘测量角度时，一定的角度方位对应于一定的编码。

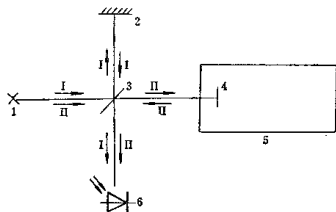


图1-7 激光干涉仪工作原理

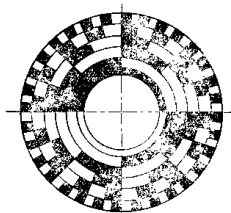


图1-8 码盘

绝对码信号经译码直接给出数字示值。测量结果只与读数时状态有关，而与测量中间过程无关，因此它抗干扰能力很强，常用于国防、航行、重型机械加工等需要进行长时间监控的设备中。绝对码传感器也常用于称重中，以避免重物突然加入后引起的来回晃动影响示值。

3. 开关信号

开关信号可视作绝对码信号的一个特例。它只有一个或若干个码道，每一个码道只有0、1两个不同的状态。电触式、光电式传感器、感应接近开关等常给出开关信号。它用于判断通断、亮暗、有无、被测量是否超差、所属组别等等。

§ 1-4 仪器电路的类型与组成

根据被测参数的不同，信号类型的不同，仪器的功能要求不同，仪器电路可以按不同方法分类。但是从仪器电路最基本的类型看，可以分为模拟式与数字式电路两大类。

一、模拟式电路的基本组成

图1-9是模拟式电测量仪的典型组成。这里传感器包括它的基本转换电路，例如调幅电路中的电桥、调频电路中的振荡器，传感器的输出已经是电量。不一定每台仪器都有图中各个部分。例如，如果传感器的输出是非调制信号，显然就不需要解调器，也没有向传感器供电的振荡器。在调幅式电路中，振荡器一方面使传感器信号受到调制，另一方面为解调器提供参考信号。在调频式电路中，振荡器与传感器结合在一起，不需要另外的振荡器向它供电，有的电路中有另外的本机振荡器是为了频率比较。在测量一些简单参数的仪器中，可以不要运算电路。图中模数转换电路与计算机二部分画在虚线框内，典型的模拟式仪器中没有这二部分。以模拟电路为基础的数字式仪器中通过模数转换得到数字信号。在需要储存大量数据、进行大量计算或有其它逻辑控制的情况下，采用计算机。

有的仪器中采用零位测量法。经放大和信号分离等处理后驱动伺服机构按一定方向转动

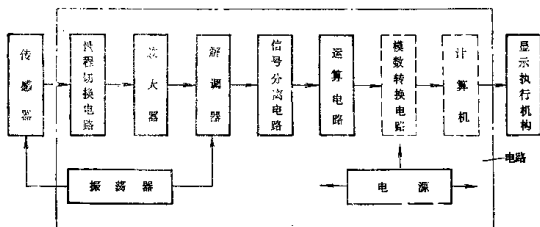


图1-9 模拟式量仪的典型组成

(图1-10)，引入补偿量（有时补偿量直接加到传感器中），直至信号放大处理电路输出为零为止。采用零位测量法可以免除一系列误差因素，例如传感器供电电压与放大器放大倍数的变化等的影响，同时具有较大的量程和较好的线性。零位测量法又称平衡测量法，伺服跟踪法。

二、数字式电路的基本组成

增量码数字式量仪的典型组成见图1-11。传感器输出的增量码信号经放大后送入细分电路。有一类细分方法建立在对放大器输出的模拟量进行矢量运算的基础上，细分后再形成脉冲数字信号。在这种情况下不需要整形电路，在细分中完成脉冲形成与整形。

另一类是先将放大器的输出整形，成为脉冲信号再细分。有时，例如图1-7中工作台5每移动 $\lambda/2$ 增量码信号变化一个周期，细分后的脉冲当量不是一个便于读出的量，这时需用脉冲当量变换电路将它变换为便于读出的量。辨向

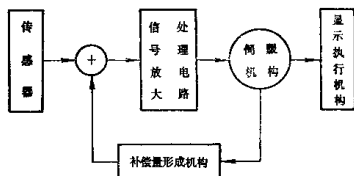


图1-10 零位测量法原理

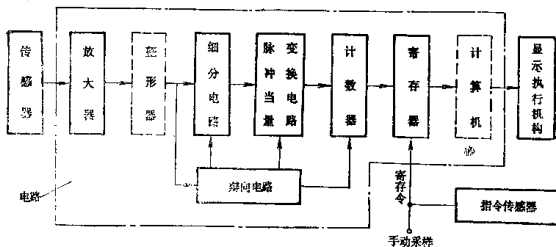


图1-11 增量码数字式仪器的典型组成

电路用于辨别工作台运动方向，它控制计数器和当量变换电路作加法或减法计数。有时，它也作用于细分电路。需要采样时，手动或由另一传感器发存指令，例如测线纹尺时光电显微镜发出瞄准信号，测重力加速度时发出时段信号。测量数据经计算机运算处理或直接显示。

图1-9和图1-11中都把计算机看作仪器电路的一部分，因为在很多智能仪器中它们是密不可分的。

还有一类仪器，例如传动链测试仪，它实质上是测量两个参数，然后进行比较。图1-12是它的框图。图中比较电路常用相位计来比较两路信号的相位差。也可用计数器，一路作加法计数，另一路作减法计数。这类仪器中为了画出误差曲线，常用数模转换电路将数字量转换为模拟量，推动记录器工作。

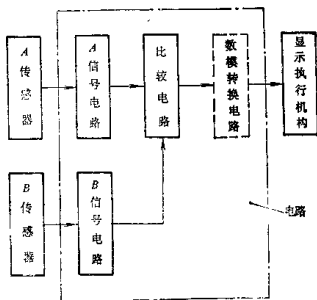


图1-12 两路信号比较式仪器

§ 1-5 仪器电路的发展趋势

当今，仪器电路发展日新月异，其主要发展趋势可概括为：

(1) 优质化 为满足科技发展的需要，依靠半导体工业提供的可能性，电子器件的性能不断完善。一些低噪声、高稳定性、高输入阻抗、高频响、宽频带、高保真度的电子器件不断出现、指标不断刷新、价格不断下降。诚然，不是一个器件同时满足上述要求，因为并不是在所有情况下对各种性能都有高要求，何况上述指标中有的还是互相有矛盾的。一方面要看到新电子器材给我们提供的完善电路性能的可能性，另一方面又要按实际需要合理选择器件。

优质化的一个重要方面是提高电路的工作可靠性。随着电路，特别是大规模集成电路的迅速发展，一个电路中包含的晶体管等元器件数目越来越多。一个含有 10^4 个晶体管的电路，如若单个器件的可靠性为 0.9999，那么这个电路的总体可靠性仅为 $0.9999^{10^4} \approx 0.37$ 。当单个器件的工作可靠性为 0.999999时，整个电路的工作可靠性约为 0.905。为使整个电路的工作可靠性达 0.99，要求单个器件的可靠性达 0.999999。从这一数字可以看出，现代仪器对元器件的质量，特别是工作可靠性提出了极严的要求。

(2) 集成化 仪器电路向集成化发展趋势包括：1) 集成块的密集度越来越高，一个晶体管的尺寸已可小到 $1\mu\text{m}$ ，在一块芯片上制作几十万只、上百万只晶体管已成为现实，实际限制因素往往是一块芯片上输入和输出引脚数不能太多；2) 采用集成块的范围越来越宽广，不仅放大器、逻辑数字电路采用集成块，而且如锁相环、脉宽调制电路等都已有集成块。

集成电路不仅体积小、功耗小，而且引线短、寄生因素小，整个组件处于同样工作环境

下，抗干扰性能好，易于达到较高精度、较高频响。

集成电路的一个特点是有源元件容易制作，无源元件比较困难，这使得在电路构成上采用晶体管越来越多，而阻容等元件减少，采用电感、变压器更少。另一个特点是集成电路参数不易精确，但一块片上参数一致性较好，这导致采用差分、平衡电路越来越多。

(3) 数字化 数字式电路不仅读数方便、客观、量程大、能较好解决量程与分辨率的矛盾，而且 1) 易于集成化，因为在数字电路中重复运用同类组件较多；2) 抗干扰能力强，因为数字电路只需判别有、或无 1、0 两个状态；3) 便于动态采样，便于记忆保存；4) 便于与计算机联用。所以数字电路在精密仪器中应用越来越广。

但是，数字电路不可能完全代替模拟电路，因为客观存在的被测量多数是模拟的。而且仪器的精度还主要取决于前级模拟接收与转换、模拟放大、模数转换上。一些小量程的模拟式测微仪器分辨率和精度都不低于纯数字式仪器。而且比较简单、成本较低。然而确实存在越来越多地用数字式电路、模数转换尽可能安排在测量系统前级的趋势。

(4) 通用化 通用化有三方面含义：1) 在一个电路中尽量采用相同的单元电路，这给元器件的订购、电路调试、电路集成化都带来方便；2) 整个仪器的构成采用电路模块化、积木化。例如相应的电感传感器加上锁相放大器（含振荡器）与电子计算机（含模数转换电路）就可构成测量各种物理量的电感式量仪。采用这种模块组合方式的好处是：各种基本功能仪器由专业厂生产，有利于提高质量、降低成本。对使用单位来说，这些基本功能仪器可视需要组合、互相借用，提高使用效率；3) 推广通用仪器。当然专用仪器比较简单便宜，对一些常规的、重复的、大量的测试任务，专用仪器还很有必要。仪器的通用化也不是要求仪器的功能十分齐全，而是基本仪器比较简单，可以通过增加附件，联接扩展器等等，来满足各种测试任务的需要。

(5) 自动化与智能化 随着计算机的迅速发展，其性能日益完善、价格不断下降。微处理机与微计算机在仪器中的应用日益广泛。它使仪器具有两个显著的特点：柔性自动化与智能化。仪器可以灵活地按照人们编定的程序要求自动地完成测量操作，采集测量数据，自动进行调节和校正。它有记忆功能，进行测量信息的存储和学习，即按人们第一遍的操作，自动进行以后的操作。它有逻辑判断和运算功能，自动选择量程，进行数据处理，自动诊断故障甚至自动修复。它能根据以前的测量过程，总结经验教训，在以后的测量中自动地选用更合理的测量方案。智能化正处在开发研究的阶段，因此现在还很难对智能化的全部含义作一个确切的概括。

仪器电路中硬件常常为软件所代替，硬件软件化具有灵活、经济的特点，但有时使速度受到限制。

§ 1-6 课程的性质与学习方法

本课程是精仪专业的一门专业课。它通过几何量和机械量测量仪器中常用单元电路和电路系统的讲授，使学生熟悉怎样运用电子技术解决测量中的任务。它不是一般电子学的深化和提高课，而要着重讲清，如何在测量与电子学之间架起桥梁，如何在测量中合理应用电子技术，如何与光、机密切配合，实现仪器总体思想，如何围绕一个“精”字与测量任务的其它要求来选用或设计电路。在精密仪器电路中则着重讲授具有普遍意义的典型单元电路和电路