

仪器电路

YIQI DIANLU

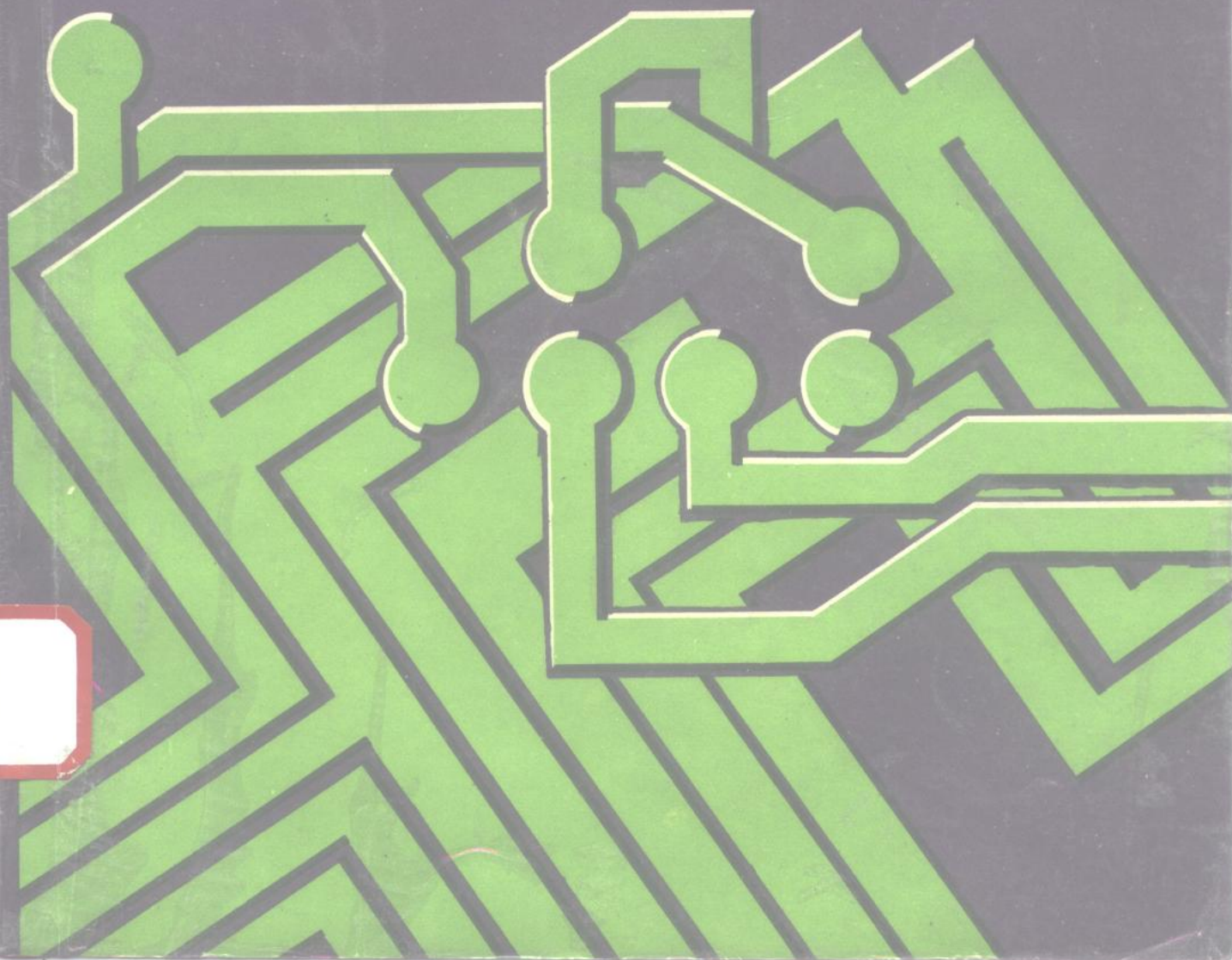
# 仪器电路

曾全堃 编著

重庆大学出版社

103

社



# 仪 器 电 路

曾全堃 编著

重庆大学出版社

## 内容简介

本书共八章。重点讲述了几何量与机械量测量仪器中的信号变换、提取、放大、处理、转换与传输,以及数字信号的细分、辨向及鉴相处理等功能电路及其相互连接,构成各具特色的整机电路。还对图象传感器信号处理、数模与模数转换电路及其应用和抗干扰技术作了深入分析。

特别突出了工程实际应用和实践能力培养。

本书可作为高等院校精密仪器、机电一体化、检测技术及仪器、测试计量技术及仪器等专业的教材。也可作为从事测量仪器和电子技术、测试技术、自动控制技术及微机应用等工作的工程技术人员的参考书。

## 仪器电路

曾全望 编著

责任编辑 韩洁 彭宁

\*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆电力印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:16.75 字数:418千

1996年3月第1版 1996年3月第1次印刷

印数:1~4000

ISBN 7-5624-1115-8/TM·47 定价:15.00元

(川)新登字 020号

# 前 言

随着科学技术的发展,对仪器仪表的检测精度、效率、自动化及智能化的程度要求越来越高。因而,机、电、光、算与检测及计量技术相结合,是现代测量技术及仪器和科技的发展方向。为了适应现代科学技术的发展,满足仪器仪表学科的需要及突出仪器电路的共性,设置了“仪器电路”这门课程。

本书为了加强读者对测量仪器及检测装置的常用电路、功能电路及整机电路的基础理论学习和对设计、分析、实践能力的培养,因而,系统地对各种信号变换技术、信息提取方法及信号处理技巧,控制、执行的措施和抗干扰技术的论述和剖析,使其理论联系实际,提高实践能力及素质。

全书共八章。第一章介绍了“仪器电路”的功用、要求、类型、组成及发展趋势。第二章介绍了仪用放大器的特点,设计方法及各类传感器接口电路的结构与特点和各种集成放大器的工作原理及应用。第三章介绍了信号处理的信号分离,限幅及运算电路的工作原理及应用和各种信号参量转换电路。第四章介绍了各种信号调制方式及解调电路和检测仪器电路。第五章介绍了数字式测量电路的细分、辨向及鉴相处理的工作原理、电路结构及应用。第六章介绍了D/A、A/D转换电路的原理及相互连接和应用。第七章介绍了图象传感器信号处理电路的原理及动态检测系统。第八章介绍了如何将接地和屏蔽正确结合的抗干扰技术。

本书在内容取材上立足于工程应用。各章均附有一定量的实用功能电路及检测系统电路,使读者能更好地理解上述功能电路的作用及相互关系,便于理论和实践融为一体,解决实际工程问题。

重庆大学何振江教授、廖海洋副教授、王代华博士生及邓冬梅工程师在编写过程中对本书给予了很大帮助,在这里表示诚挚的感谢。

由于本人水平有限,错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

1995年7月

# 目 录

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>第一章 概论 .....</b>             | <b>1</b>  |
| § 1-1 《仪器电路》课程的性质、任务及内容 .....   | 1         |
| § 1-2 仪器电路的功用 .....             | 2         |
| § 1-3 对仪器电路的主要要求 .....          | 3         |
| § 1-4 仪器电路的类型与组成 .....          | 5         |
| § 1-5 仪器电路的发展趋势 .....           | 7         |
| <b>第二章 信号放大电路 .....</b>         | <b>9</b>  |
| § 2-1 噪声的基础知识 .....             | 9         |
| § 2-1-1 噪声的种类与性质 .....          | 9         |
| § 2-1-2 处理放大器噪声的方法 .....        | 11        |
| § 2-2 信号放大器设计 .....             | 13        |
| § 2-2-1 信号放大器的组成 .....          | 13        |
| § 2-2-2 传感器与放大器的接口 .....        | 14        |
| § 2-2-3 设计放大器的步骤和准则 .....       | 15        |
| § 2-3 传感器接口电路——典型前置放大电路 .....   | 16        |
| § 2-3-1 低阻抗前置放大电路 .....         | 17        |
| § 2-3-2 高阻抗前置放大电路 .....         | 19        |
| § 2-3-3 一般输入阻抗前置放大电路 .....      | 21        |
| § 2-4 集成运算信号放大电路 .....          | 21        |
| § 2-4-1 集成同相放大电路 .....          | 22        |
| § 2-4-2 集成反相放大电路 .....          | 24        |
| § 2-4-3 集成差动放大电路及其派生电路 .....    | 27        |
| § 2-4-4 高精度、低漂移直流放大电路 .....     | 36        |
| § 2-4-5 隔离放大器 .....             | 45        |
| § 2-4-6 程控增益放大器 .....           | 48        |
| § 2-4-7 电荷放大器 .....             | 52        |
| <b>第三章 信号处理电路 .....</b>         | <b>57</b> |
| § 3-1 检测电路中滤波和削波电路的应用 .....     | 57        |
| § 3-1-1 检测信息分析及信号取舍措施 .....     | 57        |
| § 3-1-2 缺陷检测装置的信号处理电路 .....     | 59        |
| § 3-2 有源滤波电路 .....              | 60        |
| § 3-2-1 有源滤波器分类和基本参数 .....      | 61        |
| § 3-2-2 组成二阶有源滤波器的基本方法 .....    | 62        |
| § 3-2-3 二阶有源滤波器传递函数的分析和设计 ..... | 63        |
| § 3-2-4 有源滤波器设计 .....           | 66        |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| § 3-3 限幅电路 .....                 | 73         |
| § 3-3-1 限幅电路概述及二极管箝位作用 .....     | 73         |
| § 3-3-2 单向限幅器 .....              | 74         |
| § 3-3-3 双向限幅器 .....              | 77         |
| § 3-3-4 区间限幅器 .....              | 82         |
| § 3-4 运算电路 .....                 | 84         |
| § 3-4-1 运算放大器典型电路的原理及电路结构 .....  | 84         |
| § 3-4-2 运算电路在自动检测中的应用 .....      | 94         |
| § 3-5 信号参量转换电路 .....             | 98         |
| § 3-5-1 电压—电压转换电路( $U/U$ ) ..... | 99         |
| § 3-5-2 电压—电流转换电路( $U/I$ ) ..... | 100        |
| § 3-5-3 电流—电压转换电路( $I/U$ ) ..... | 105        |
| § 3-5-4 电压—频率变换电路( $U/f$ ) ..... | 107        |
| § 3-5-5 频率—电压变换电路( $f/U$ ) ..... | 110        |
| § 3-5-6 电流—频率变换电路( $I/f$ ) ..... | 113        |
| <b>第四章 模拟式测量电路及调制与解调电路 .....</b> | <b>115</b> |
| § 4-1 调幅式测量电路及其应用 .....          | 115        |
| § 4-1-1 幅度调制与解调概念 .....          | 115        |
| § 4-1-2 幅度调制与解调 .....            | 116        |
| § 4-2 调频式测量电路及其应用 .....          | 128        |
| § 4-2-1 频率调制与解调 .....            | 128        |
| § 4-2-2 调频式测量电路的应用 .....         | 136        |
| § 4-3 调相式测量电路 .....              | 138        |
| § 4-3-1 调相的原理与方法 .....           | 138        |
| § 4-3-2 鉴相电路 .....               | 140        |
| § 4-4 脉冲调制式测量电路 .....            | 144        |
| § 4-4-1 脉冲调制原理 .....             | 144        |
| § 4-4-2 脉冲调制信号的解调 .....          | 146        |
| § 4-4-3 脉宽调制测量电路 .....           | 147        |
| § 4-4-4 脉冲信号积分信息提取方法 .....       | 147        |
| § 4-4-5 脉冲开关积分信息提取方法 .....       | 149        |
| <b>第五章 数字式测量电路及细分与辨向 .....</b>   | <b>151</b> |
| § 5-1 电子细分电路 .....               | 151        |
| § 5-1-1 直传式细分电路 .....            | 151        |
| § 5-1-2 相位切割细分电路 .....           | 155        |
| § 5-1-3 电平切割细分电路 .....           | 161        |
| § 5-1-4 平衡补偿式细分 .....            | 164        |
| § 5-2 辨向电路 .....                 | 165        |
| § 5-2-1 微分与门式(电位—脉冲)辨向电路 .....   | 165        |
| § 5-2-2 异或与门式辨向电路 .....          | 168        |
| § 5-2-3 与门式判别电路在自动检测中的应用 .....   | 168        |

|                                         |            |
|-----------------------------------------|------------|
| § 5-2-4 积分与门式辨向电路 .....                 | 170        |
| § 5-2-5 高分辨率辨向电路 .....                  | 171        |
| § 5-3 感应同步器测量电路 .....                   | 173        |
| § 5-3-1 感应同步器工作原理 .....                 | 173        |
| § 5-3-2 感应同步器信号处理系统 .....               | 175        |
| § 5-3-3 鉴相跟踪式感应同步器的主要功能电路 .....         | 176        |
| § 5-4 开环位移测量系统 .....                    | 180        |
| § 5-4-1 开环位移测量系统的原理框图 .....             | 180        |
| § 5-4-2 反向间隙自动补偿电路 .....                | 181        |
| § 5-4-3 测量系统的正、负符号显示和加减计数控制电路 .....     | 182        |
| <b>第六章 数模与模数转换电路及其应用 .....</b>          | <b>183</b> |
| § 6-1 数模转换器(D/A)及其应用 .....              | 184        |
| § 6-1-1 权电阻网络 D/A 转换器 .....             | 184        |
| § 6-1-2 梯形电阻网络 D/A 转换器 .....            | 186        |
| § 6-2 数模转换器的应用电路 .....                  | 187        |
| § 6-2-1 毫伏定值器——变形权电阻网络 D/A 转换器 .....    | 187        |
| § 6-2-2 实际 D/A 转换器 .....                | 188        |
| § 6-2-3 D/A 转换器与微处理器接口 .....            | 191        |
| § 6-3 积分式模数转换电路(A/D) .....              | 193        |
| § 6-3-1 单积分式 A/D 转换器 .....              | 194        |
| § 6-3-2 双斜积分式 A/D 转换器 .....             | 195        |
| § 6-3-3 双积分型实际 A/D 转换器及应用 .....         | 197        |
| § 6-4 逐次比较逼近式模数转换电路(A/D) .....          | 201        |
| § 6-4-1 8 位 A/D 转换器 ADC0809 .....       | 201        |
| § 6-4-2 12 位 A/D 转换器 ADC1210/1211 ..... | 203        |
| § 6-4-3 A/D 转换器与 CPU 的接口 .....          | 204        |
| § 6-5 微机处理与控制系统 .....                   | 207        |
| § 6-5-1 微机处理与控制的圆柱直径自动分选机 .....         | 207        |
| § 6-5-2 图象传感微机处理与控制的细丝测径 .....          | 210        |
| <b>第七章 图象传感器信号处理电路 .....</b>            | <b>214</b> |
| § 7-1 光电二极管列阵信号变换电路 .....               | 214        |
| § 7-1-1 光电二极管列阵电路 .....                 | 214        |
| § 7-1-2 光电二极管列阵的驱动电路 .....              | 215        |
| § 7-1-3 光电二极管列阵传感器 .....                | 216        |
| § 7-2 光电二极管列阵图象信号处理电路 .....             | 216        |
| § 7-2-1 光学字符识别机的模拟信号处理原理 .....          | 216        |
| § 7-2-2 字符识别机信号处理电路 .....               | 217        |
| § 7-3 电荷耦合器件信号变换电路 .....                | 219        |
| § 7-3-1 三相 CCD 信号电荷的存储和传输 .....         | 220        |
| § 7-3-2 线阵 CCD 驱动电路 .....               | 221        |
| § 7-4 电荷耦合器件动态检测电路 .....                | 223        |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| § 7-4-1 几何量轮廓信息提取法的动态检测电路 .....    | 223 |
| § 7-4-2 光脉冲直接计量法的动态检测 .....        | 227 |
| § 7-4-3 CCD 光脉冲计量法动态尺寸自动检测电路 ..... | 229 |
| § 7-4-4 细长棒料的长度动态自动检测装置 .....      | 235 |
| <b>第八章 抗干扰技术</b> .....             | 237 |
| § 8-1 干扰与抑制 .....                  | 237 |
| § 8-1-1 应用系统主要干扰源 .....            | 237 |
| § 8-1-2 电源和接地系统的干扰及抗干扰措施 .....     | 237 |
| § 8-1-3 I/O 通道干扰及抗干扰措施 .....       | 240 |
| § 8-1-4 长线传输技术 .....               | 242 |
| § 8-1-5 长线传输过程中的窜扰 .....           | 245 |
| § 8-1-6 数字电路引起的干扰 .....            | 246 |
| § 8-2 屏蔽与地线 .....                  | 248 |
| § 8-2-1 空间干扰及抗干扰措施 .....           | 248 |
| § 8-2-2 地线系统 .....                 | 249 |
| § 8-2-3 其它抗干扰技术 .....              | 255 |
| § 8-2-4 微机系统的布线设计 .....            | 257 |
| <b>参考文献</b> .....                  | 260 |



# 第一章 概 论

## § 1-1 《仪器电路》课程的性质、任务及内容

### 一、课程性质

本课程是精密仪器、机电一体化、测试计量技术与检测技术及仪器等专业的主干后续专业课。随着科学技术的发展,对检测精度、效率、自动化、智能化的程度要求越来越高。因而,机、电、光、算与检测及计量技术相结合是现代仪器及科技的发展方向。本课程通过几何量、机械量及物理量的检测与计量仪器的常用单元电路和系统电路的学习,使其熟悉怎样运用电子技术,解决实际工程中的检测、计量及控制任务。电工学、电子技术基础课,为学习本课程必需的先修课,传感器、几何量测量、机械量测量、测试技术、微机原理及应用等课与本课程有密切关系。只有学好这些课程,才能深刻理解本课程所讲授的各种单元功能电路,在现代仪器及机电一体化装置中的作用,以及单元功能电路之间的相互连接,构成整机系统电路。本课程是一门实践性很强的专业课程。

### 二、课程的任务

本课程的任务是:

1. 了解仪器电路在检测及计量仪器和机电一体化装置中的作用,了解仪器电路与传感器、微机及其相关技术与学科在现代仪器中的关系。
2. 熟悉各类检测及计量仪器中常用的单元功能电路。
3. 了解上述功能电路在仪器中的相互连接及逻辑关系。
4. 学会按实际工程技术要求,选用、分析、设计,相应系统电路的基本方法及技能。
5. 通过相关的实践环节,培养动手能力。

### 二、课程的内容和要求

该课程,主要通过对几何量、机械量、及物理量的检测及计量仪器的常用单元功能电路和整机电路分析和探讨。

1. 按照信号的流程,熟悉模拟式与数字式仪器的基本组成;分析各单元功能电路的原理及性能;各电路之间的相互连接;与传感器及微机的接口关系。探讨影响单元电路及整个仪器的可靠性、稳定性的因素,如何提高仪器及装置可靠性、稳定性的常用措施。

2. 讲授如何将传感器输出的测量信号,进行信号提取、放大、调制、解调,信号分离、运算、

细分、辨向、变换,信号转换、处理、逻辑控制、驱动、显示等单元功能电路及新型功能器件应用电路与图象传感器信号处理电路和地线系统与抗干扰技术。

3. 能按实际工程技术要求,会合理地选用上述单元功能电路,进行简单的整机系统电路设计。

4. 学会使用常用电子仪器,掌握分析电路及调试电路的方法,实践技巧的能力。

## § 1-2 仪器电路的功用

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。

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。从而提高了检测仪器的分辨率,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,经光电转换变为电信号,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)电路的反应速度快、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。

## § 1-3 对仪器电路的主要要求

对仪器电路的要求,首先是围绕检测及计量提出来的,当然也还有其它一些要求。

### 一、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,而且含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,在工件椭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椭圆度的工件直径最大差值选取出来。

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离,否则也会带来测量误差。

### 二、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、采取适宜的抗干扰措施外,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比较正电路,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。

### 三、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。在机械量测试中,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,从而使它有较强抗干扰能力。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信号的完善性能。对于视听设备,在通带内衰减几个分贝一般说是允许的。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,有较高的频率响应速度。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。

### 四、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)在换档时只是改变分度值,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显著频率失真,还有补偿其它部分引起的频率失真的功能。

### 五、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,即送

到显示执行机构的电量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。

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适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。

## 六、输入与输出阻抗

对仪器电器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。合理的要求使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。

## 七、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,仪器电器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。

# § 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 1-1 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,或变频。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。

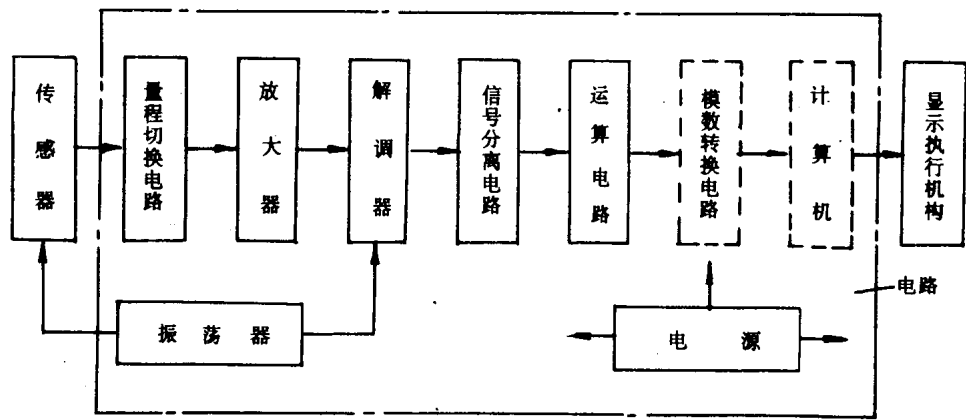


图 1-1 模拟式量仪的典型组成

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 1-2, 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。辨向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。

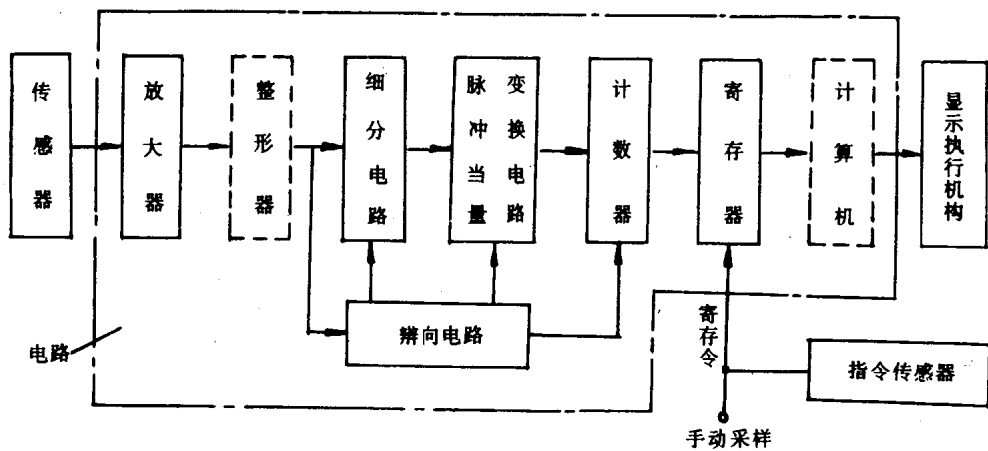


图 1-2 增量码数字式仪器的典型组成

## § 1-5 仪器电路的发展趋势

当今,仪器电器发展日新月异,其主要发展趋势可概括为:

### 一、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、高稳定度、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 0.999 9,那么这个电路的总体可靠性仅为  $0.999\ 9^{10\ 000} \approx 0.37$ 。当单个器件的工作可靠性为 0.999 99 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 0.999 999。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。

### 二、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,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。

### 三、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、无或 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。

#### 四、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。

#### 五、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。

仪器电器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。



## 第二章 信号放大电路

信号放大器是为了将微弱的传感器信号,放大到足以推动指示器、记录器或各种控制机构。通常传感器的输出信号只有几毫伏,甚至更小;而输入到放大器的噪声与放大器件自身产生的噪声,往往大于放大器的输入信号。这时如何减少噪声,或把噪声与信号分离,是信号放大器设计者的一个重要课题。本章首先介绍有关噪声的知识。

### § 2-1 噪声的基础知识

从广泛的意义上讲,噪声就是干扰有用信号的某种不希望的扰动。

干扰和噪声,没有本质的区别。通常,把外部来的称干扰,内部产生的称噪声。

噪声又可分为白噪声和色噪声两种。所谓白噪声是指噪声的波形是随机的,即它的幅值、相位、频率都是随机的,其瞬时值不能预测,但每赫兹带宽内包含的噪声功率,从统计观点看是一个常数,例如从 1Hz 到 2Hz 带宽内的噪声功率等于 1000Hz 到 1001Hz 带宽内的噪声功率。色噪声是指噪声的频率是固定的,是可以预测的,而幅值和相位有可能是随机的。通常的接地噪声是一种色噪声。

#### § 2-1-1 噪声的种类与性质

仪器电路中常见的固有噪声有热噪声、低频噪声和散弹噪声及电阻产生的过剩噪声和开关产生的尖峰噪声五种。以下将分别进行讨论。

##### 一、热噪声

热噪声是由导体中的电荷载流子的热激振动引起的噪声。

处于绝对零度以上的任何导体中,都存在着电子的随机运动,这种运动与温度有关。电子的随机运动便在导体中产生很多电流脉冲,尽管这些脉冲电流的平均值为零,但方均值电压  $U_i^2(t)$  不为零,且可用下式表示:

$$U_i^2(t) = 4kTRB \quad (2-1)$$

同理,噪声的方均根电压的表示式为:

$$U_i(t) = \sqrt{4kTRB} \quad (2-2)$$

式中  $k$ ——玻耳兹曼常数,为  $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ;

$T$ ——导体的绝对温度;

$B$ ——测量系统的噪声带宽;