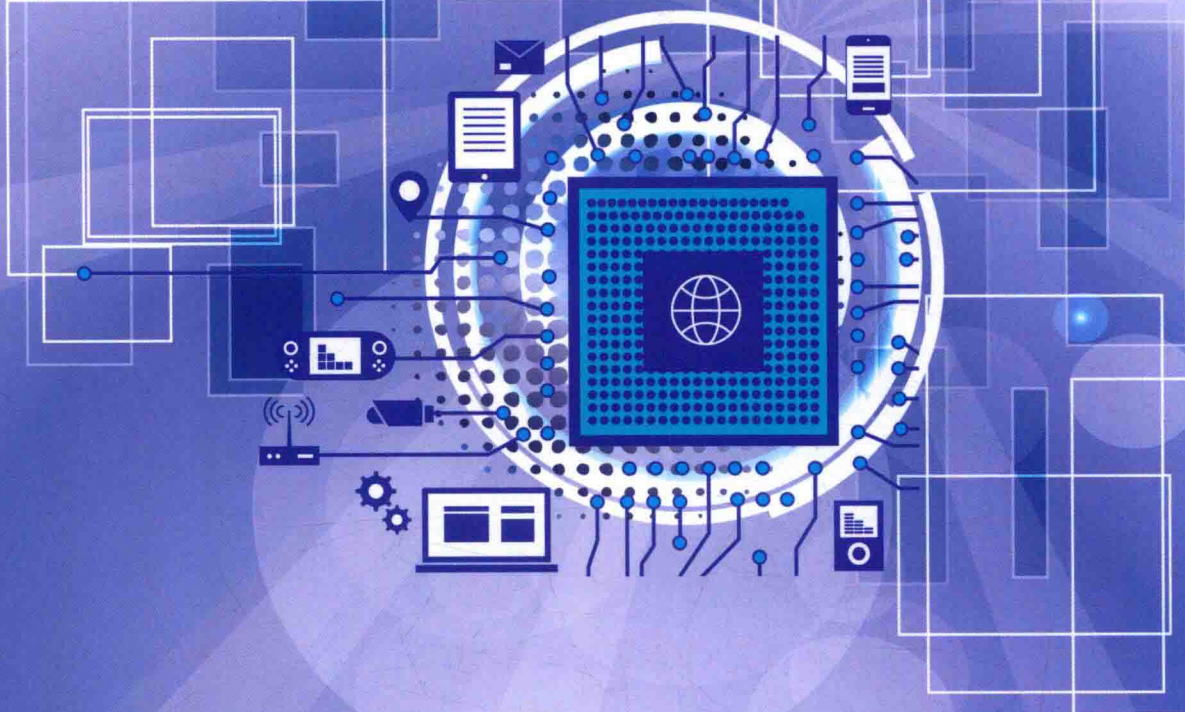





普通高等教育仪器类“十三五”规划教材



测控电路及应用

徐耀松 周 围 贾丹平 主 编
任志玲 闫孝姮 刘宏志 副主编

非
外
借

 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育仪器类“十三五”规划教材

测控电路及应用

主 编 徐耀松 周 围 贾丹平

副主编 任志玲 闫孝姮 刘宏志



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地介绍了测控电路技术的基本概念和基本理论,以及工业生产和科学研究中常用的测量与控制电路。主要内容包括:测控电路概述、传感器与接口电路、信号放大电路、信号滤波、信号运算电路、信号转换电路、信号调制与解调电路、控制输出电路等,并进行测控电路设计实例的综合介绍。本书结构合理、内容翔实、实例丰富,具有较高的应用性。另外,书中采用二维码技术实现知识点的扩展。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、计算机应用、电子信息、机电一体化、仪器仪表等相关专业本科的教材,也可供有关教师、科研人员和工程技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

测控电路及应用 / 徐耀松, 周围, 贾丹平主编. —北京: 电子工业出版社, 2018.10
普通高等教育仪器类“十三五”规划教材
ISBN 978-7-121-34734-4

I. ①测… II. ①徐… ②周… ③贾… III. ①电气测量—控制电路—高等学校—教材 IV. ①TM930.111

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 151566 号

策划编辑: 赵玉山

责任编辑: 刘真平

印 刷: 三河市君旺印务有限公司

装 订: 三河市君旺印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 14.5 字数: 371.2 千字

版 次: 2018 年 10 月第 1 版

印 次: 2018 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: zhaoy@phei.com.cn。

普通高等教育仪器类“十三五”规划教材

编 委 会

主 任：丁天怀（清华大学）

委 员：陈祥光（北京理工大学）

王 祁（哈尔滨工业大学）

王建林（北京化工大学）

曾周末（天津大学）

余晓芬（合肥工业大学）

侯培国（燕山大学）

前 言

本书循序渐进地介绍了测控技术的基本概念和基本理论，介绍了测控系统设计中涉及的基本内容，同时包括工程设计实例。本书突出工程特色，以工程教育为理念，围绕培养应用创新型工程人才这一培养目标，着重学生的独立研究能力、动手能力和解决实际问题能力的培养，将测控技术与仪器专业工程人才培养模式和教学内容的改革成果体现在教材中，通过科学规范的工程人才教材建设促进专业建设和工程人才培养质量的提高。

全书共9章。第1章介绍测控系统的组成与特点，然后介绍测控电路的功能要求、类型组成，通过介绍，使读者对测控系统及测控电路的基本概念进行深刻理解；第2章介绍常见的传感器及其接口电路，主要包括热电阻、电容传感器、电涡流传感器、压阻式传感器、压电传感器、光电传感器等，通过接口电路及应用实例，对相关传感器的原理及应用进行介绍；第3章介绍信号放大电路，包括同相放大器、反相放大器、电荷放大器、仪用放大器、程控增益放大器、隔离放大器等；第4章介绍信号滤波技术，包括滤波器基本概念、滤波器特性的逼近、RC滤波电路及有源滤波器设计方法等；第5章介绍信号运算电路，包括常见的数学运算、微积分电路及特征值运算电路等；第6章介绍信号转换电路，包括采样/保持、电压/电流变换、电压/频率变换、电压比较、模拟数字转换电路等；第7章介绍信号调制与解调电路，包括调幅式测量电路、调频式测量电路、脉冲调制式测量电路及集成锁相电路；第8章介绍控制输出电路；第9章介绍测控电路设计实例。

本书注重与工程实践的联系，采用二维码技术对相关知识点进行扩充，可以通过扫描二维码，打开对知识点的更多辅助介绍，包括相关文字介绍、图片展示或动画演示。

本书第1、2、5章由徐耀松执笔；第3、8章由周围执笔；第4章由任志玲执笔；第6章由闫孝姮执笔；第7章由刘宏志执笔；第9章由贾丹平执笔。全书的写作思路由付华教授提出，由付华和徐耀松统稿。此外，李恩源、李猛、赵博雅、赵珊影、谢鸿、赵星、刘子洋、司南楠、陈东、于田、孟繁东、梁漪、邱尚龙、齐晓娟、梁小飞、王传为、王治国、谭亮等也参加了本书的编写工作。在此，向对本书的完成给予热情帮助的同行人表示感谢。

由于作者水平有限，加上时间仓促，书中的错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者
2018年2月

目 录

第 1 章 测控电路概述	(1)
1.1 测控电路的类型与组成	(1)
1.1.1 测量电路的基本组成	(2)
1.1.2 控制电路的基本组成	(3)
1.2 测控电路的功能与要求	(4)
1.3 测控电路的设计	(6)
1.4 测控电路中的噪声及干扰	(7)
1.4.1 干扰及其抑制	(8)
1.4.2 电路噪声	(10)
1.5 测控电路的发展趋势	(12)
思考题与习题	(13)
第 2 章 传感器与接口电路	(14)
2.1 概述	(14)
2.1.1 传感器	(14)
2.1.2 传感器的组成	(15)
2.1.3 传感器的作用与地位	(15)
2.1.4 传感器的分类与选用	(16)
2.2 热电阻的接口电路	(18)
2.2.1 热电阻	(18)
2.2.2 接口电路	(19)
2.3 电容式传感器的接口电路	(19)
2.3.1 电容式传感器的原理及结构形式	(19)
2.3.2 电容式传感器的主要特性	(20)
2.3.3 电容式传感器的测量电路	(20)
2.4 电涡流式传感器的接口电路	(23)
2.5 电位器式传感器的接口电路	(25)
2.5.1 电位器式传感器	(25)
2.5.2 电位器式传感器的驱动电路	(27)
2.6 差分变压器式传感器	(30)
2.7 压阻式传感器的接口电路	(33)
2.7.1 基本工作原理	(33)
2.7.2 压阻式压力传感器	(34)
2.7.3 压阻式传感器输出信号调理	(35)
2.8 压电式传感器的接口电路	(37)
2.8.1 压电效应简介	(37)

2.8.2	压电材料及其主要特性	(37)
2.8.3	等效电路与测量电路	(39)
2.9	光电式传感器	(41)
2.9.1	光电效应	(41)
2.9.2	常见光电器件	(41)
	思考题与习题	(44)
第3章	信号放大电路	(45)
3.1	集成运算放大器基础	(45)
3.2	反相运算放大器	(48)
3.3	同相运算放大器	(49)
3.4	基本差动放大器	(51)
3.5	电荷放大器	(52)
3.6	仪用放大器	(54)
3.7	隔离放大器	(58)
3.8	程控增益放大器	(62)
	思考题与习题	(65)
第4章	信号滤波	(66)
4.1	滤波器概述	(66)
4.1.1	滤波器的分类	(67)
4.1.2	滤波器的主要特性指标	(68)
4.1.3	滤波器的传递函数与频率特性	(69)
4.2	滤波器特性的逼近	(72)
4.2.1	巴特沃斯逼近	(72)
4.2.2	切比雪夫逼近	(73)
4.2.3	贝塞尔逼近	(74)
4.3	RC滤波电路	(75)
4.3.1	一阶滤波电路	(75)
4.3.2	压控电压源型滤波电路	(76)
4.3.3	无限增益多路反馈型电路	(78)
4.3.4	双二阶环电路	(79)
4.4	有源滤波器设计	(82)
4.4.1	有源滤波器设计步骤	(82)
4.4.2	滤波器辅助设计软件	(85)
4.5	数字滤波器	(95)
4.5.1	数字系统的数学描述	(95)
4.5.2	数字滤波原理简介	(96)
4.5.3	数字滤波器的实现	(99)
	思考题与习题	(100)
第5章	信号运算电路	(103)
5.1	概述	(103)
5.2	加减法运算电路	(103)

5.2.1	同相加法运算电路	(104)
5.2.2	反相加法运算电路	(104)
5.2.3	减法运算电路	(105)
5.3	对数与指数运算电路	(105)
5.3.1	对数运算电路	(105)
5.3.2	指数运算电路	(107)
5.4	乘除与乘方、开方运算电路	(108)
5.4.1	模拟乘法器组成的运算电路	(108)
5.4.2	基于对数/指数运算的乘法/除法运算电路	(109)
5.4.3	乘方、开方运算电路	(111)
5.5	微分与积分运算电路	(112)
5.5.1	常用积分运算电路	(112)
5.5.2	常用微分运算电路	(113)
5.5.3	PID 运算电路	(114)
5.6	特征值运算电路	(117)
5.6.1	绝对值运算电路	(117)
5.6.2	峰值检测电路	(117)
	思考题与习题	(118)
第 6 章	信号转换电路	(119)
6.1	采样/保持 (S/H) 电路	(119)
6.2	电压/电流变换电路	(121)
6.3	电压/频率变换电路	(122)
6.4	电压比较电路	(124)
6.4.1	过零比较电路和单阈值电压比较电路	(125)
6.4.2	滞回比较电路	(127)
6.4.3	窗口比较电路	(129)
6.5	模拟数字转换电路	(130)
6.5.1	概述	(130)
6.5.2	模数转换器 (ADC)	(130)
6.5.3	数模转换器 (DAC)	(133)
	思考题与习题	(135)
第 7 章	信号调制与解调电路	(138)
7.1	调制与解调的作用与类型	(139)
7.2	调幅式测量电路	(139)
7.2.1	调幅原理与方法	(139)
7.2.2	包络检波电路	(143)
7.2.3	相敏检波电路	(147)
7.3	调频式测量电路	(158)
7.3.1	调频原理与方法	(158)
7.3.2	鉴频电路	(161)
7.4	调相式测量电路	(163)

7.4.1	调相原理与方法	(163)
7.4.2	鉴相电路	(166)
7.5	脉冲调制式测量电路	(170)
7.5.1	脉冲调制原理与方法	(170)
7.5.2	脉冲调制信号的解调	(172)
7.5.3	脉冲调制测量电路应用举例	(172)
7.6	集成锁相电路	(173)
7.6.1	锁相环路基本工作原理	(173)
7.6.2	锁相环路的相位模型及性能分析	(173)
7.6.3	集成锁相环路	(174)
	思考题与习题	(175)
第8章	控制输出电路	(176)
8.1	功率开关驱动电路	(176)
8.2	继电器	(182)
8.3	直流电机驱动电路	(187)
8.4	步进电机驱动电路	(190)
	思考题与习题	(198)
第9章	测控电路设计实例	(199)
9.1	电流输出型温度传感器 AD590 的测量电路	(199)
9.1.1	AD590 的功能与特性	(199)
9.1.2	AD590 的工作原理	(200)
9.1.3	AD590 的常见测量电路	(202)
9.1.4	AD590 的应用实例	(203)
9.2	高精度铂电阻测温电路	(205)
9.2.1	铂电阻传感原理	(205)
9.2.2	铂电阻的接线方式	(205)
9.2.3	高精度铂电阻测温实例	(207)
9.3	超声测距应用电路	(210)
9.4	湿度测量电路	(212)
9.5	微振动测量电路	(213)
9.6	光电感烟火灾探测器测量电路	(215)
9.6.1	光电感烟火灾探测器的工作原理	(215)
9.6.2	光电感烟火灾探测器的调理电路设计	(216)
	思考题与习题	(219)
	参考文献	(220)

第1章

测控电路概述

本章知识点:

- 测控电路的类型与组成
- 测控电路的功能与要求
- 测控电路设计方法
- 测控电路中的噪声及干扰

基本要求:

- 理解测控电路的分类及典型测控电路的组成
- 掌握测控电路的功能与设计流程
- 理解测控电路中典型的噪声及干扰

能力培养目标:

通过本章的学习,了解测控电路的性质,明确测控电路的作用、分类及基本组成,理解测控电路的设计流程,对影响测控电路性能的噪声、干扰及误差等因素进行学习,了解测控电路的发展趋势。

所谓“测控系统”,就是测量与控制系统的简称。“测量”和“控制”是人类认识世界和改造世界的两个必不可少的重要手段。“测量”(或检测)是人们借助于专门的设备,通过实验的方法,对某一客观事物取得数量信息的过程。测控系统不仅仅适用于工业领域,也广泛地应用于科学实验、农业、国防、地质勘探、交通和医疗健康等国民经济各个领域及人们的日常生活中。测量系统是人类感觉器官的延伸,控制系统则是人类肢体的延伸;所以,测控系统拓展了人们认识和改造自然的能力。门捷列夫说过:“有测量才有科学。”任何一项科学研究都离不开相应的有效的测量和实验手段。钱学森院士说:“新技术革命的关键技术是信息技术。信息技术由测量技术、计算机技术、通信技术三部分组成。测量技术则是关键和基础。”科学的发展、突破往往是以检测仪器和技术方法上的突破为先导的。测控系统在工作生产中起着把关者和指导者的作用,广泛应用于炼油、化工、冶金、电力、电子、轻工、纺织等行业。

测控系统的性能在很大程度上取决于测控电路,测控电路又分为测量电路与控制电路,它们是测控系统实现测量与控制功能的基本电路,在整个测控系统中起着十分关键的作用。

1.1 测控电路的类型与组成

测控电路的组成随被测参数、信号类型与控制系统的功能和要求的不同而异。

1.1.1 测量电路的基本组成

1. 模拟式测量电路的基本组成

图 1-1 所示是模拟式测量电路的基本组成。传感器包括其基本转换电路,如电桥。传感器的输出已是电物理量(电压或电流)。根据被测量的不同,可进行相应的量程切换。传感器的输出一般较小,常需要放大。图中所示各个组成部分不一定都需要。例如,对于输出非调制信号的传感器,就不需用振荡器向它供电,也不用解调器。在采用信号调制的场合,信号调制与解调用同一振荡器输出的信号作为载波信号和参考信号。利用信号分离电路(常为滤波器),将信号与噪声分离、将不同成分的信号分离,取出所需信号。有的被测参数比较复杂,或者为了控制目的,还需要进行运算。对于典型的模拟式电路,无须模数转换电路和计算机,而直接通过显示执行机构输出。越来越多的模拟信号测量电路输出数字信号,这时需要模数转换电路。在需要较复杂的数字和逻辑运算或较大量的信息存储情况下,采用计算机。图中振荡器、解调器、运算电路、模数转换电路和计算机画在虚线框内,表示有的电路中没有这些部分。

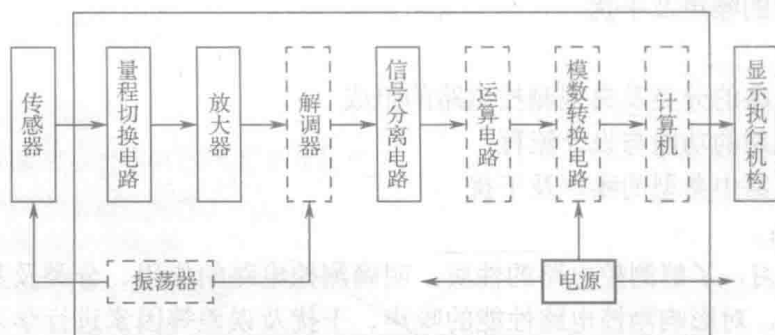


图 1-1 模拟式测量电路的基本组成

2. 数字式测量电路的基本组成

数字式信号包括增量码信号、绝对码信号和开关信号。

采用光栅、激光干涉法等测量位移时传感器的输出为增量码信号。增量码信号的特点是被测量值与传感器输出信号的变换周期数成正比,即量值的大小由信号变化周期数的增量决定。增量码信号是一种反映过程的信号,或者说是一种反映变化量的信号,它与被测对象的状态并无一一对应的关系,信号一旦中断,就无法判断物体的状态。绝对码信号是一种与状态相对应的信号,例如码盘,其每一个角度方位对应于一组编码,这种编码称为绝对码。开关量信号可视为绝对码信号的特例,当绝对码信号只有一位编码时,就成了开关信号,开关信号只有 0 和 1 两个状态。

增量码数字式测量电路的基本组成见图 1-2。一般来说增量码传感器输出的周期信号也是比较微小的,需要首先将信号放大。传感器输出信号一个周期所对应的被测量值往往较大,为了提高分辨力,需要进行内插细分。可以对交变信号直接处理进行细分,也可能需先将它整形成为方波后再进行细分。在有的情况下,增量码一个周期所对应的量不是一个便于读出的量(例如,在激光干涉仪中反射镜移动半个波长信号变化一个周期),需要对脉冲当量进行变换。被测量增大或减小,增量码都做周期变化,需要采用适当的方法辨别被测量变化的方向,辨向电路按辨向结果控制计数器做加法或减法计数。在有的情况下辨向电路还同时控制细分与脉冲当量变换电路做加或减运算。采样指令到来时,将计数器所计的数送入锁存器,显示执行机构显示

该状态下被测量值，或按测量值执行相应动作。在需要较复杂的数字和逻辑运算或较大量的信息存储情况下，采用计算机。

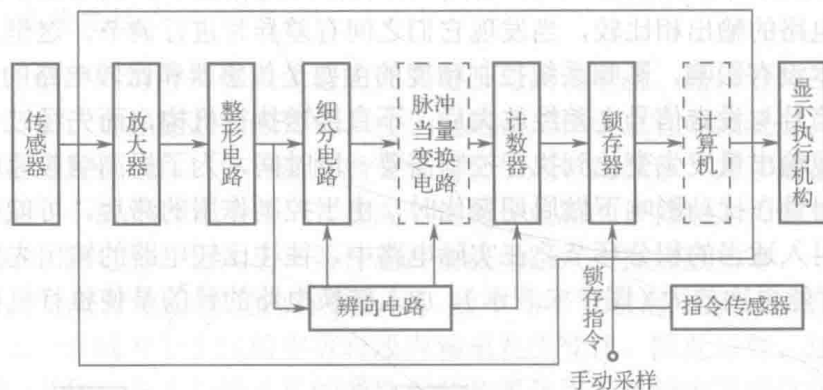


图 1-2 增量码数字式测量电路的基本组成

绝对码和开关式测量电路比较简单，它基本上就是一套逻辑电路，以适当方式译码，进行显示和控制。

1.1.2 控制电路的基本组成

控制方式可分为开环控制与闭环控制两种，这两类控制系统的组成也不同。

1. 开环控制

开环控制系统的基本组成如图 1-3 所示。为了获得所需的输出，在控制系统的输入端通过给定机构设置给定信号，如通过一个多刀开关或电位器设定所需炉温。通过设定电路将它转换成电压信号，经放大和转换后控制执行机构改变加热电阻丝中的电流，使炉子（被控对象）获得所需温度。只要让输入的设定信号按设定规律变化，即可让输出按所要求的规律变化。图中虚线框内所示部分为控制电路。

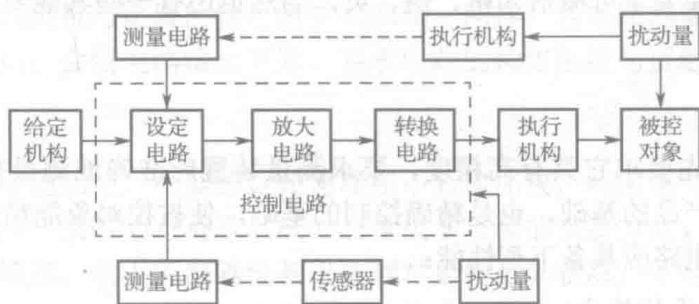


图 1-3 开环控制系统的基本组成

显然，这种控制系统难以保证系统的输出符合所要求。首先，系统能够获得正确的输出是建立在输入与输出有确定的函数关系基础上的。也就是说系统的模型，或者说它的传递函数正确、不变。系统的传递函数的任何变化将引起输出的变化。其次，不可避免地会有扰动因素作用在被控对象上，引起输出的变化。为了补偿扰动的影响，可以通过传感器对扰动进行测量，通过测量电路在设定上引入一定修正，以抵消扰动的影响。但是这种控制方式同样不能达到很高的精度。一是对扰动的测量误差影响控制精度；二是扰动模型的不精确性影响控制精度，比较好的方法是采用闭环控制。

2. 闭环控制

闭环控制系统的基本组成见图 1-4。它的主要特点是用传感器直接测量输出量，将它反馈到输入端与设定电路的输出相比较，当发现它们之间有差异时进行调节。这里系统和扰动的传递函数对输出基本没有影响，影响系统控制精度的主要是传感器和比较电路的精度。在图 1-4 中，传感器反馈信号与设定信号之差经放大后，不直接送执行机构，而先经过一个校正电路。这主要考虑从发现输出量发生变化到执行控制需要一段时间，为了提高响应速度常引入微分环节。另外，当输出量在扰动影响下做周期变化时，由于控制作用的滞后，可能产生振荡，为了防止振荡，需要引入适当的积分环节。在实际电路中，往往比较电路的输出先经放大再送入校正电路，视需要可能再次放大（图中未表示）。加入转换电路的目的是使执行机构获得所需类型的控制信号。

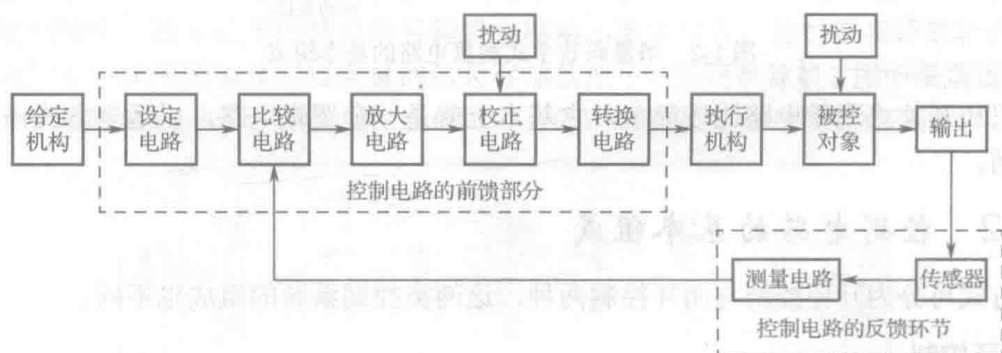


图 1-4 闭环控制系统的基本组成

1.2 测控电路的功能与要求

对测控电路的主要要求可概括为精、快、灵，当然也还有一些其他要求，如可靠性与经济性。

1. 精度高

对于测控电路首先要求它具有高精度，要求测量装置能准确地测量被测对象的状态与参数，这是获得高质量产品的基础，也是精确控制的基础，使被控对象能精确地按要求运行。为了实现高精度，测控电路应具备下列性能：

1) 低噪声与高抗干扰能力

在精密测量中，要精确测得被测参数的微小变化，这时传感器输出信号的变化往往是很微小的，为了保证高的测量精度，必须要求电路具有低噪声与高抗干扰能力，这里包括选用低噪声器件，合理安排电路，合理布线与接地，采取适当的隔离与屏蔽等。由于送到电路第一级的信号最小，因此第一级电路需特别精心安排，尽量缩短传感器到第一级电路的连线，前置放大器往往置入传感器内。

对信号进行调制，合理安排电路的通频带，对抑制干扰有重要作用。对信号进行调制就是给信号赋予一定特征，使它与非所需的信号（可将它们视为干扰）相区别，再通过合理安排电路的通频带等，只让所需信号通过，从而抑制干扰。

采用具有高共模抑制比的电路,对抑制干扰也有重要作用,因为大多数干扰表现为共模干扰。它同时作用于差动电路的两个输入端,采用高共模抑制比差动电路能有效地抑制干扰。

2) 低漂移与高稳定性

大多数电子元器件的特性,如放大器的失调电压与失调电流、晶体管与二极管的漏电流,都会受温度影响而在一定程度上发生变化。由于电路在工作中总有电流流过,不可避免地会产生热量,从而使电路发生漂移。外界温度的变化也会引起电路漂移。为了减小漂移,首先应选择温漂小,即对温度不敏感的元器件,其次应尽量减小电路的,特别是关键部分的温度变化。这里包括减小电路中的电流,让大功率器件远离前级电路,安排好散热等。

电路工作稳定是保证电路精度的首要条件。噪声与干扰引起电路在短的时段内工作不稳定。漂移使电路在一天或若干小时的中等时段内输出发生变化。除此以外,还有电路长期工作稳定性、元器件的老化、开关与接插件的弹性疲劳和氧化引起接触电阻变化等,都是影响电路长期工作稳定性的主要原因。

3) 线性与保真度好

线性度是衡量一个仪器或系统的精度的又一重要指标。从理论上讲,一个系统也可按非线性定标,这时输入与输出间具有非线性关系并不一定影响精度,但大多数情况下,要求系统的输入与输出间具有线性关系。这是因为线性关系使用方便,如线性标尺便于读出,在换挡时不必重新定标,进行模数转换、细分、伺服跟踪时不必考虑非线性因素,波形不失真,等等。

保真度是由视、听设备中借用的概念。为使波形不失真,除要求电路有良好的线性外,还要求在信号所占有的频带内有良好的频率特性。

4) 有合适的输入与输出阻抗

即使电路完全没有误差,在将它用于某一测控系统中时,仍然有可能给系统带来误差。例如,若测量电路的输入阻抗太低,在接入电路后,就会使传感器的状态发生变化。从不影响前级的工作状态出发,要求电路有高输入阻抗。但输入阻抗越高,输入端噪声也越大,因此合理的要求是使电路的输入阻抗与前级的输出阻抗相匹配。同样,若电路的输出阻抗太大,在接入输入阻抗较低的负载后,会使电路输出下降。要求电路的输出阻抗与后级的输入阻抗相匹配。

2. 响应快

生产的节奏在不断地加快,机器的运转速度在不断地加快,响应速度快就成为对测控电路性能的另一项重要要求。实时动态测量已成为测量技术发展的主要方向。测量电路没有良好的频率特性、高的响应速度,就不能准确地测出被测对象的运动状况,无法对被测系统进行准确控制。对一个存在高速变化因素的运动系统,控制的滞后可能引起系统产生振荡,振荡的幅度还可能越来越大,导致系统失去稳定。为了能够测出快速变化的参数,为了使一个高速运动系统稳定,要求测控电路有高的响应速度和良好的频率特性。

3. 转换灵活

为了适应在各种情况下测量与控制的需要,要求测控电路有灵活的进行各种转换的能力。它包括:

1) 模数与数模转换

自然界客观存在的物理量多为模拟量,传感器的输出信号也以模拟信号居多。为了读数方

便和提高在信号传输中的抗干扰能力,为了便于与计算机连接和便于长期保存等,常常需要数字信号,这就需要模数转换;而为了控制执行机构动作,又常需要模拟信号,这时又需数模转换。

2) 信号形式的转换

模数与数模转换是信号形式转换的一种,为了信号处理与传输上的需要,还常需要进行直流与交流、电压与电流信号之间的转换。一个信号的大小可以用它的幅值、相位、频率、脉宽等表示,为了信号处理、传输与控制上的需要,也常需要进行幅值、相位、频率与脉宽信号等之间的转换。

3) 量程的变换

一个测控系统需要测量和控制的量可以差百万倍以上,为了适应测量、控制不同大小量值的需要,而不引起饱和与显著的失真,电路应根据信号的大小进行量程的变换。

4) 信号的选取

一个实际的信号中不仅包括信号与噪声,而且在信号中也包含具有不同特征的信号,如不同频率的信号。这些不同特征的信号可能由不同的源产生,也可能有不同的物理含义。在测量与控制中常要选取某一频率或某一频带,或某一瞬时的信号,电路应具有选取所需信号的能力。

5) 信号的处理与运算

在测量与控制中常需要对信号进行处理与运算,如求平均值、差值、峰值、绝对值、导数、积分等。这里也包括对非线性环节进行线性化处理与误差补偿,进行复杂函数运算,进行逻辑判断等。

4. 可靠性与经济性

随着科技与生产的发展,测控系统应用越来越广、规模越来越大,这对可靠性提出了越来越高的要求。如果单个晶体管(或PN结)的可靠性为0.9999,当一个集成块上集成了10000个晶体管,并假定它们的工作可靠性是相互独立的,则整个集成块的可靠性仅为 $0.9999^{10000} \approx 0.368$ 。假如在整个系统中有100个这样的集成电路块,其可靠性仅为 $0.368^{100} \approx 3.8 \times 10^{-44}$ 。为使系统的可靠性达到0.99,要求单个集成电路块的可靠性达0.9999,而要求单个晶体管的可靠性达0.99999999。从这个例子可以看到,一个现代系统对器件的可靠性提出了多高的要求。

对测控电路的另一个要求是它的经济性。一个成本高昂的电路难以获得广泛应用。要在满足性能要求的基础上,尽可能地简化电路。要合理设计电路,能在不对器件提出过分要求的情况下获得较好的性能。

1.3 测控电路的设计

一般情况下,设计一套测控系统,要遵循自上而下的原则,先从整体考虑:

- 被测量的量是信号的大小与频率。
- 要控制的量。
- 系统的测量与控制的精度、性能。

- 系统的使用条件。
- 系统所具有的功能，如信号的显示、记录、存储及其他一些功能。
- 系统的成本、设计或研发的时间、工艺条件。

在系统的功能确定之后，也就把系统的大致结构确定了下来。再以信号增益（信号的放大倍数）和误差分配，来确定前向信号通道（指从传感器到模数转换器的模拟信号放大、处理部分电路）所需信号放大、滤波或变换电路的级数，各级的增益，滤波器的阶数、形式和截止频率等。下一步则要确定各个组成部分的具体设计要求。

应该注意的是，绝对不能将各级电路孤立地考虑，必须考虑到电路前、后级之间的联系。而电路前、后级之间联系的主要因素是输出、输入阻抗和信号幅值。

(1) 对于模拟信号的放大与滤波等信号处理电路而言，一般说来，前级电路的输出阻抗越小越好。对后级电路而言，前级的输出阻抗相当于后级电路的信号源内阻，前级输出阻抗过大，必将影响后级电路的幅频特性和增益及其稳定性，如图 1-5 所示。

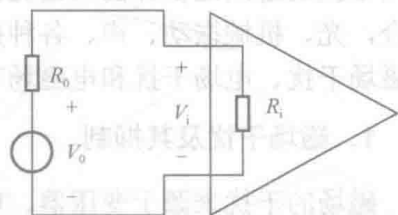


图 1-5 前级的输出阻抗对后级电路的影响

后级放大器所得到的实际信号幅值为

$$V_i = \frac{V_0 R_i}{R_0 + R_i} \quad (1-1)$$

相比之下，如果 $R_0=0$ ，则 $V_i=V_0$ 。显然，由于前级电路输出阻抗的原因使得后级电路的实际输入信号的幅值下降了，从而降低了整个电路的增益，使信号的幅值与预计的不符。同样的原因，前级电路的输出阻抗与后级电路的电容（如果后级电路是滤波器，或者后级电路存在输入分布电容）构成了一个附加的低通滤波器，改变了后级低通滤波器的截止频率。不管为何种情况，都改变了电路的参数。

(2) 后级电路的输入阻抗是前级电路的负载。电路的负载过重，必然要影响前级电路的性能，严重时前级电路甚至不能工作。现在的器件工作电压越来越低、功耗越来越小，这方面必须引起足够的重视。如后级电路为一反相放大器，其输入电阻为 $10\text{k}\Omega$ ，这在许多情况下已足够高，但有许多新型的微功耗运算放大器，这样大小的负载已足以使其不能正常工作。

(3) 合适的信号幅值。微弱信号检测的前向信号通道经常需要有几级放大器和滤波器。通常情况下干扰信号的幅值往往要远大于有用信号的幅值，放大器和滤波器应该交错地分布。否则，虽然有用信号经过几级放大后并未超出后面的放大器和滤波器的动态范围，但由于干扰信号早已超出放大器和滤波器的动态范围，从而产生非线性失真，一旦产生了非线性失真，就再也无法消除。一般说来，当产生一定大小的非线性失真时会导致测控系统不能正常工作。

1.4 测控电路中的噪声及干扰

一般说来，噪声是被测对象和仪器内部固有的，而干扰则是被测对象和仪器以外的原因造成的。噪声和干扰是微弱信号检测的一个主要限制因素。因为放大器的增益越高，越容易受外来干扰的影响。电路内部存在的固有噪声将使系统的信号噪声比降低，固有噪声较大时，输出端的噪声将淹没有用信号。但有时又很难严格地将噪声和干扰区别开来，如系统内部的电源或后级电路对前级电路的影响，各级电路之间通过电源的不良耦合等，这些都对系统产生不良影响，但又难以区别开来，所以，有时把两者统称为噪声。在需要详细讨论噪声的来源与抑制方

法时, 把要讨论的电路之外的原因造成的影响称为干扰, 而把电路内部产生的影响称为噪声。

测控系统设计的关键是“噪声”而不是“放大”。在多数情况下, 不考虑噪声的放大是很容易实现的, 但也是没有意义的。实际上, 去除噪声不仅仅是测控系统设计的重点, 也是难点。

对测量系统而言, 精度是一个主要的指标。从测量学的角度来看, 被测量的“真值”是不可能得到的, 人们只能测得尽可能趋近这个“真值”的值。除了干扰和噪声外, 影响测控系统准确性的重要因素是放大器和滤波器等电路的增益, 合理地考虑和分配各级电路的误差, 也是保证测控系统达到设计指标的重要环节。

1.4.1 干扰及其抑制

干扰的起因是多样的。常见的干扰可分为磁场干扰、电场干扰和电磁场干扰等。但在许多场合, 光、机械振动、声、各种射线等都有可能对测控系统产生干扰。限于篇幅, 这里简要讨论磁场干扰、电场干扰和电磁场干扰等的来源及其抑制方法。

1. 磁场干扰及其抑制

磁场的干扰来源于变压器、电动机和荧光灯的镇流器等设备, 这些设备中的线圈通以交流电时, 就会产生一个交变的磁场, 在交变磁场中的其他导线环路, 或其他线圈都会感应出电动势。根据法拉第电磁感应定律, 这种干扰的强度与电路或线圈的环路面积成正比。磁场干扰直接影响测控系统, 必须采取措施予以抑制。一般来说, 磁场干扰的频率较低, 作用距离较近, 作用较强。

1) 磁场干扰的检测

改变设备或电路的放置方向(但不改变空间位置), 检测电路的输出, 如果输出信号的幅值发生变化, 即可初步判定存在磁场干扰。如果电路输出信号的频率与可能的干扰源的工作频率相同(如日光灯的镇流器或其他设备的电源变压器的工作频率为 50Hz), 则可有进一步的把握判定磁场干扰的来源。有可能的话, 停止可能的干扰源的工作, 如果电路的输出也显著降低甚至消失, 此时可以确定产生磁场干扰的来源。

比较难判断的磁场干扰是测控系统内部的干扰源, 如测控系统内部的电源变压器或其他部件。有可能的话, 可以采用外部电源供电或改变电路与可能的干扰源的相对方位, 或者用铁磁材料做成的盒子将可能的干扰源盖住。如果电路的输出显著降低甚至消失, 则可以确定产生磁场干扰的来源。

2) 磁场干扰的抑制方法

抑制磁场干扰的方法主要有以下几种:

(1) 屏蔽或去除干扰源。可能的话, 用铁磁材料做成的盒子(屏蔽盒)将可能的干扰源封闭起来, 或者移去已确定的干扰源。由于导磁材料与空气的磁导率相差不大(一般仅有 3~4 个量级, 不像导电材料与空气的电导率那样相差十几个量级), 因而磁屏蔽的作用有限。

(2) 如果第(1)条难以做到, 那么可以用屏蔽盒将电路或比较敏感的部分(一般是传感器、信号输入部分和前级放大器)屏蔽起来。

(3) 减小电路或敏感部分的环路面积。

(4) 改变电路或敏感部分的方位, 使其环路的方位与干扰磁场的方位平行。