



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 测控电路

第4版

天津大学 张国雄 主 编  
天津大学 李醒飞 副主编



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

免费电子课件

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 测 控 电 路

## 第 4 版

主 编 张国雄  
副主编 李醒飞  
参 编 赵美蓉 冉多纲 崔天祥 胡 毅  
        廖海洋 张仁杰  
主 审 强锡富 唐文彦



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家规划教材，主要作为测控技术与仪器专业本科生教材，同时可供相关领域工程技术和研究人员及相邻专业研究生参考。与第3版相比主要增加了测控电路设计实例一章，旨在增强学生创新思维与解决工程实际问题能力的培养。

本书主要介绍工业生产和科学研究中常用的测量与控制电路的各个功能块和总体连接，使读者熟悉怎样运用电子技术来解决测量与控制中的任务。在电子技术与测量、控制间架起一座桥梁，合理地进行电路总体设计和功能块的选用。

内容包括：测控电路的功用、类型、组成、发展趋势和对它的主要要求；低漂移、高性能测量放大器，隔离和可控放大电路；精密测量中为了将信号与噪声分离、提高信噪比而采用的各种调幅、调频、调相、脉冲调宽和解调电路，以及各种RC有源滤波电路、集成滤波器、跟踪滤波器；为了完成复杂的测量与控制任务而采用的代数、微积分（含PID）、特征值运算电路，以及采样保持、电压与电流、频率转换电路和模拟数字转换电路；增量式数字测量中常用的细分与辨向电路；数字和模拟系统中应用的连续信号的脉宽控制和变频控制电路，二值和可编程逻辑控制电路，以及数字控制电路；并通过几个典型的测控系统的剖析，使读者对测控系统整体及测控电路在其中的作用有进一步的了解。全书围绕精度、灵活性、快速响应、可靠性等主要要求对电路进行分析，为测控电路设计提供思路。

## 图书在版编目（CIP）数据

测控电路/张国雄主编. —4版. —北京：机械工业出版社，2011.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-33155-1

I. ①测… II. ①张… 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（2011）第010998号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：贡克勤 责任编辑：贡克勤 任正一 版式设计：霍永明

责任校对：申春香 封面设计：王伟光 责任印制：李妍

唐山丰电印务有限公司印刷

2011年4月第4版第1次印刷

184mm×260mm·18.5印张·457千字

标准书号：ISBN 978-7-111-33155-1

定价：37.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

读者购书热线：(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

当今的时代是信息时代，在工业和科技领域信息主要通过测量获取。在现代生产中，物质流和能量流在信息流指挥和控制下运动。测控技术已经成为现代生产和高科技中的一项必不可少的基础技术。为了适应这一发展需要，并培养宽基础、具有创造性的人才，将整个仪器仪表类专业集中为“测控技术与仪器”一个专业，而“测控电路”是它的一门重要课程。

测控系统主要由传感器（测量装置）、测量控制电路（简称测控电路）和执行机构三部分组成。在整个测控系统中电路是最灵活的部分，它具有便于放大、便于转换、便于传输、便于适应各种使用要求的特点。测控系统乃至整个机器和生产系统的性能在很大程度上取决于测控电路。

《测控电路》是根据1996年10月全国高等学校仪器仪表类教学指导委员会第一次会议决定，作为测控技术与仪器专业的规划教材，并根据随后拟定的教学大纲编写的。它可作为测控技术与仪器专业的教材，也可供机械工程类其他专业选用。本书除作为教材外，还可供有关科学研究和工程技术人员参考。

《测控电路》2002年获全国优秀教材二等奖，并先后被确定为普通高等教育“十五”和“十一五”国家级规划教材。第4版对全书进行了修订，更注重共性内容讲解，拓宽适用面，增加了测控电路设计实例一章，旨在增强学生创新思维与解决工程实际问题能力的培养。

全书共10章，第1章绪论主要介绍测控电路的功用和对它的主要要求、测控电路的类型与组成，以及它的发展趋势，使学生对测控电路有一个总体概念。由于由传感器输入的信号一般很微弱，本书第2章讲述放大电路，特别是低漂移、高共模抑制比以及测控系统中需要的其他高性能放大电路。信号与噪声的分离、各种信号的分离是测控技术中的一个重要问题，第3、4两章围绕这一命题讨论信号的调制、解调与信号分离电路（主要是滤波器）。为了完成各种复杂的测量与控制任务、实现高性能，常需对信号进行各种转换与运算，第5、6两章介绍信号运算和转换电路，并通过过程调节器电路的分析帮助学生理解它们在测控系统中的连接与作用。增量码传感器在大位移测量与各种可以转换为位移的测量中有广泛应用，细分与辨向是这类传感器应用的关键技术，第7章讲述信号细分与辨向电路。第8、9两章分别介绍两种应用最为广泛的控制电路：连续信号控制电路和逻辑与数字控制电路，并结合数控机床实际，进行阐述与剖析。第10章通过对动力调谐陀螺仪再平衡回路的设计讨论，使学生对测控系统设计思路及测控电路在其中的作用有进一步的理解。

本书由天津大学张国雄教授任主编，天津大学李醒飞任副主编。参加编写的有（按章节的顺序）：天津大学张国雄（编写第1、3章）、天津大学赵美蓉（编写第2章）、河北工业大学冉多纲（编写第4章）、哈尔滨工业大学崔天祥（编写第5章）、合肥工业大学胡毅（编写第6章）、天津大学李醒飞（编写第7、10章）、重庆大学廖海洋（编写第8章）、上海理工大学张仁杰（编写第9章）。主审为哈尔滨工业大学强锡富、唐文彦教授。

由于我们水平有限，加之测控电路的发展十分迅速，很多方面跟不上形势的发展，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。



# 目 录

## 前言

## 第1章 绪论 ..... 1

### 1.1 测控电路的功用 ..... 1

### 1.2 对测控电路的主要要求与特点 ..... 2

#### 1.2.1 精度高 ..... 3

#### 1.2.2 动态性能好 ..... 4

#### 1.2.3 高的识别和分析能力 ..... 4

#### 1.2.4 可靠性高 ..... 5

#### 1.2.5 经济性好 ..... 5

### 1.3 测控电路的输入信号与输出信号 ..... 5

#### 1.3.1 模拟信号 ..... 5

#### 1.3.2 数字信号 ..... 7

### 1.4 测控电路的类型与组成 ..... 8

#### 1.4.1 测量电路的基本组成 ..... 8

#### 1.4.2 控制电路的基本组成 ..... 9

### 1.5 测控电路的发展趋势 ..... 11

### 1.6 课程的性质、内容与学习方法 ..... 12

### 思考题与习题 ..... 13

## 第2章 信号放大电路 ..... 14

### 2.1 运算放大器的误差及其补偿 ..... 14

#### 2.1.1 实际运算放大器及其特性 ..... 14

#### 2.1.2 失调及其补偿 ..... 15

#### 2.1.3 转换速率和最大不失真频率 ..... 17

#### 2.1.4 运算放大器的振荡与相位补偿 ..... 18

### 2.2 噪声的基础知识 ..... 20

#### 2.2.1 噪声的种类与性质 ..... 21

#### 2.2.2 处理放大器噪声的方法 ..... 22

### 2.3 典型测量放大电路 ..... 24

#### 2.3.1 测量放大电路的基本要求与类型 ..... 24

#### 2.3.2 反相放大电路 ..... 25

#### 2.3.3 同相放大电路 ..... 26

#### 2.3.4 基本差动放大电路 ..... 27

#### 2.3.5 高共模抑制比放大电路 ..... 29

#### 2.3.6 低漂移放大电路 ..... 32

#### 2.3.7 高输入阻抗放大电路 ..... 36

#### 2.3.8 电荷放大电路 ..... 38

#### 2.3.9 电流放大电路 ..... 41

#### 2.3.10 电桥放大电路 ..... 42

#### 2.3.11 增益调整放大电路 ..... 44

### 2.4 隔离放大电路 ..... 49

#### 2.4.1 基本原理 ..... 50

#### 2.4.2 通用隔离放大电路 ..... 51

#### 2.4.3 增益可调隔离放大电路 ..... 54

#### 2.4.4 隔离放大电路应用举例 ..... 54

### 思考题与习题 ..... 55

## 第3章 信号调制解调电路 ..... 57

### 3.1 调幅式测量电路 ..... 57

#### 3.1.1 调幅原理与方法 ..... 57

#### 3.1.2 包络检波电路 ..... 62

#### 3.1.3 相敏检波电路 ..... 66

### 3.2 调频式测量电路 ..... 79

#### 3.2.1 调频原理与方法 ..... 79

#### 3.2.2 鉴频电路 ..... 81

### 3.3 调相式测量电路 ..... 85

#### 3.3.1 调相原理与方法 ..... 85

#### 3.3.2 鉴相电路 ..... 90

### 3.4 脉冲调制式测量电路 ..... 93

#### 3.4.1 脉冲调制原理与方法 ..... 93

#### 3.4.2 脉冲调制信号的解调 ..... 95

#### 3.4.3 脉冲调制测量电路应用举例 ..... 95

### 思考题与习题 ..... 96

## 第4章 信号分离电路 ..... 98

### 4.1 滤波器基本知识 ..... 98

#### 4.1.1 滤波器的类型 ..... 99

#### 4.1.2 模拟滤波器的传递函数与频率特性 ..... 100

#### 4.1.3 基本滤波器 ..... 103

#### 4.1.4 滤波器特性的逼近 ..... 107

### 4.2 RC 滤波电路 ..... 110

#### 4.2.1 一阶滤波电路 ..... 110

#### 4.2.2 压控电压源型滤波电路 ..... 111

#### 4.2.3 无限增益多路反馈型电路 ..... 113

#### 4.2.4 双二阶环电路 ..... 114



4.2.5 有源滤波器设计 .....	116	6.1.2 增强型 MOSFET 开关电路 .....	153
4.3 集成有源滤波器 .....	120	6.1.3 集成模拟开关 .....	154
4.3.1 开关电容滤波原理 .....	120	6.1.4 模拟多路开关电路 .....	155
4.3.2 集成有源滤波芯片介绍 .....	121	6.2 采样保持电路 .....	156
4.4 跟踪滤波器 .....	123	6.2.1 基本原理 .....	156
4.4.1 压控跟踪滤波器 .....	123	6.2.2 单片集成采样保持电路 .....	157
4.4.2 变频跟踪滤波器 .....	123	6.3 电压比较电路 .....	159
思考题与习题 .....	124	6.3.1 电平比较电路 .....	160
<b>第5章 信号运算电路 .....</b>	<b>126</b>	6.3.2 滞回比较电路 .....	160
5.1 比例运算放大电路 .....	126	6.3.3 窗口比较电路 .....	161
5.1.1 同相比例放大电路 .....	126	6.4 电压频率转换电路 .....	162
5.1.2 反相比例放大电路 .....	126	6.4.1 V/f 转换器 .....	162
5.1.3 差分比例放大电路 .....	127	6.4.2 f/V 转换器 .....	166
5.2 加法/减法运算电路 .....	127	6.5 电压电流转换电路 .....	168
5.2.1 同相加法运算电路 .....	127	6.5.1 L/V 转换器 .....	168
5.2.2 反相加法运算电路 .....	128	6.5.2 V/I 转换器 .....	169
5.2.3 减法运算电路 .....	128	6.6 模拟数字转换电路 .....	172
5.3 对数、指数和乘、除运算电路 .....	129	6.6.1 D/A 转换器 .....	172
5.3.1 对数运算电路 .....	129	6.6.2 A/D 转换器 .....	176
5.3.2 指数运算电路 .....	131	思考题与习题 .....	185
5.3.3 基于对数/指数运算的乘法/除法 运算电路 .....	132	<b>第7章 信号细分与辨向电路 .....</b>	<b>186</b>
5.3.4 变跨导乘法运算电路 .....	134	7.1 直传式细分电路 .....	186
5.3.5 乘方和开方运算电路 .....	135	7.1.1 四细分辨向电路 .....	187
5.4 常用特征值运算电路 .....	137	7.1.2 电阻链分相细分 .....	189
5.4.1 绝对值运算电路 .....	137	7.1.3 微型计算机细分 .....	192
5.4.2 峰值检测电路 .....	137	7.2 平衡补偿式细分 .....	197
5.4.3 平均值运算电路 .....	138	7.2.1 相位跟踪细分 .....	198
5.5 函数型运算电路 .....	138	7.2.2 幅值跟踪细分 .....	202
5.6 微积分运算电路 .....	140	7.2.3 脉冲调宽型幅值跟踪细分 .....	206
5.6.1 常用积分电路 .....	140	7.2.4 频率跟踪细分——锁相倍频 细分 .....	209
5.6.2 常用微分电路 .....	141	思考题与习题 .....	210
5.6.3 PID 运算电路 .....	142	<b>第8章 连续信号控制电路 .....</b>	<b>212</b>
5.7 过程调节器电路分析 .....	145	8.1 脉宽调制控制电路 .....	212
5.7.1 电平移动电路 .....	147	8.1.1 脉宽调制控制电路的工作原理 .....	212
5.7.2 PD 运算电路 .....	147	8.1.2 典型脉宽调制电路 .....	213
5.7.3 PI 运算电路 .....	148	8.1.3 脉宽调制功率转换电路 .....	218
5.7.4 调节器的传递函数 .....	149	8.1.4 同步式与异步式脉宽调制控制 电路 .....	222
5.7.5 输出电路 .....	150	8.2 导电角控制逆变器 .....	224
思考题与习题 .....	151	8.2.1 逆变器基本原理 .....	224
<b>第6章 信号转换电路 .....</b>	<b>153</b>	8.2.2 120°导电角控制逆变器 .....	225
6.1 模拟开关 .....	153	8.2.3 180°导电角控制逆变器 .....	227
6.1.1 模拟开关及其主要参数 .....	153		



8.3 变频控制电路 .....	230	9.4.5 数控立式铣床整体运行控制 .....	266
8.3.1 基本原理和分类 .....	230	思考题与习题 .....	266
8.3.2 控制方式和特性 .....	232	<b>第10章 测控电路设计实例</b> .....	<b>267</b>
8.3.3 AC-AC变频器 .....	233	10.1 动力调谐陀螺仪再平衡回路 .....	267
8.3.4 AC-DC-AC变频器 .....	234	10.1.1 再平衡回路结构 .....	268
8.3.5 脉宽调制型变频控制电路 .....	236	10.1.2 再平衡回路方案比较与选择 .....	268
思考题与习题 .....	241	10.2 系统建模 .....	270
<b>第9章 逻辑与数字控制电路</b> .....	<b>242</b>	10.2.1 陀螺模型 .....	270
9.1 二值逻辑控制与驱动电路 .....	242	10.2.2 解耦网络模型 .....	271
9.1.1 功率开关驱动电路 .....	242	10.2.3 校正网络设计及系统仿真 .....	276
9.1.2 继电器与电磁阀驱动电路 .....	245	10.3 电路设计 .....	279
9.2 异步与步进电动机驱动电路 .....	246	10.3.1 预处理电路 .....	279
9.2.1 异步电动机的二值控制电路 .....	246	10.3.2 校正电路 .....	283
9.2.2 步进电动机驱动电路 .....	247	10.3.3 控制解耦网络 .....	284
9.3 可编程逻辑器件 .....	249	10.3.4 功率放大电路 .....	285
9.3.1 可编程阵列逻辑 PAL .....	250	10.4 测试实验 .....	286
9.3.2 通用阵列逻辑 GAL .....	252	10.4.1 动力调谐陀螺仪实验测试 平台 .....	286
9.3.3 高集成度可编程逻辑器件介绍 .....	257	10.4.2 陀螺仪漂移测试 .....	286
9.4 数控机床的位移与速度测控系统 .....	258	10.4.3 陀螺仪高动态测试 .....	286
9.4.1 数控立式铣床的基本构成 .....	259	思考题与习题 .....	287
9.4.2 数控立式铣床的检测装置 .....	259	<b>参考文献</b> .....	<b>288</b>
9.4.3 数控立式铣床的控制装置 .....	259		
9.4.4 运动的测量与控制电路 .....	261		

# 第1章 绪 论

为了学习好本课程首先要弄清为什么要学、学什么、怎么学。本章首先通过阐述测控电路在生产与社会发展中的功用，对于测控电路的要求，说明为什么在学习模拟电路与数字电路后还要学习测控电路。通过介绍测控电路的类型与组成，说明本课程的主要内容。而测控电路的类型与组成在很大程度上与输入、输出信号相关。通过阐述对测控电路的要求，让学生明确应该着重从哪些方面理解、掌握与设计测控电路。学生不仅应该掌握测控电路的基本模块与连接，还应该了解电路的发展趋势。本章最后说明学习本课程的方法。

## 1.1 测控电路的功用

产品的质量和效率是衡量一切生产过程优劣的两项主要指标。为了获得高质量和高效率，测量和控制都是必不可少的。

为了保证产品质量，必须对产品进行检测，把好产品质量关。测控的目的不仅仅是了解产品质量，更主要是提高产品的质量。为此，要求机器在测控系统控制下按照给定的规程运行。例如，为了加工出所需尺寸、形状的高精度零件，机床的刀架与主轴必须精确地按所要求的轨迹作相对运动。为了炼出所需规格的钢材，除了严格按配方配料外，还必须严格控制炉温、送风、冶炼时间等运行规程。为了做到这些，必须对机器的运行状态进行精确检测，当发现它偏离规定要求，或有偏离规定要求的倾向时，要对它进行控制，使它按规定的要求运行。

除了对生产过程的检测与控制外，通过对成品进行检测，还可以检测机器与生产过程的模型是否准确，是否在按正确的模型对机器与生产过程进行控制，进一步完善对生产过程的控制。

生产效率一方面与机器的运行速度有关，另一方面取决于机器或生产系统的自动化程度。为了使机器能在高速下可靠运行，必须要求机器本身的质量高，其控制系统性能优异。要做到这两点，还是离不开测量与控制。

产品的质量离不开测量与控制，生产自动化同样也离不开测量与控制。特别是当今时代的自动化已不是20世纪初主要靠凸轮、机械机构实现的刚性自动化，而是以电子、计算机技术为核心的柔性自动化、自适应控制与智能化。越是柔性的系统就越需要检测。没有检测，机器和生产系统就不可能按正确的规程自动运行。自适应控制就是要使机器和系统能自动地去适应变化了的内外部环境条件，按最佳的方案运行，这里首先需要的是对内外部环境条件的检测，检测是控制的基础。智能化是能在复杂的、变化的环境条件下自行决策的自动化，决策的基础是对内部因素和外部环境条件的掌握，它同样离不开检测。

生产离不开测量与控制，科学研究更离不开测量与控制。门得列耶夫说过：“科学是从测量开始的，没有测量就没有科学，至少是没有真正的、精确的科学。”实践是检验真理的唯一标准，没有经过实践的检验，一些新的思想只能是假说或学说，只有经过测量等实践检



验，才能将假说或学说变为科学。许多重大发现和发明都是从测试和仪器仪表的进步开始。哈勃望远镜对天体科学的发展，扫描隧道显微镜对纳米科技的形成，起了关键作用。苹果落在牛顿头上，启发牛顿去思考。月亮不作直线运动，而绕着地球转，一定有力在吸引它。然而在牛顿的有生年代，万有引力还只是一种学说。只有随着测量技术的进步，在测得了地球与月亮的精确距离后，从量值上证明了正是地球对月亮的引力，使月亮绕着地球转，万有引力学说才成为科学。

任何高新科技的产生和发展都离不开测量和控制。当今的时代是信息时代，它是以计算机和网络的广泛应用为主要标志。而计算机的发展首先取决于大规模集成电路与存储器件制作的进步。以大规模集成电路为例，在一块芯片上能集成多少个元件取决于光刻工艺能制作出多精细的图案，而这依赖于光刻的精确重复定位，依赖于定位系统的精密测量与控制。在纳米科技中，在微机电系统中，由于尺度效应、表面效应等，许多物理、化学现象和规律都与宏观世界不尽相同，需要通过测量了解新现象、掌握新规律。神州号发射成功在很大程度上依靠测控。为了确保载人航天、登月等的成功，首先要通过测量获得大量的数据，宇宙飞船的轨迹需要按测量数据不断修正，航天飞行中需要进行各方面的科学实验，没有一项不需要测控。有数据表明，运载火箭和航天器的研制费一半用于仪器与测控手段。

测量与控制不仅在现代生产、科学研究、高新科技中是必不可少的，现代的生活、办公器械也越来越多地依赖于测量。一部现代的汽车往往装有几十个不同传感器，对点火时间、燃油喷射、空气燃料比、防滑、防碰撞等进行控制。微波炉、照相机、复印机等中也都装有不同数量的传感器，通过测量与控制使其能圆满地完成预定的功能。

我们正在全面建设社会主义小康社会，建设以人为本的和谐社会，必须把对人的关怀放在第一位。建设宜人居住造福后代的生态环境，需要对环境进行监控；开展生命科学和医学研究，需要进行检测和试验；为了保障人民的健康，需要对食品、水源、样品等进行检测。检测对于哪一个领域、哪一个方面都是不可或缺的。

测控系统主要由传感器（测量装置）、测量控制电路（简称测控电路）和执行机构三部分组成，如图 1-1 所示。传感器是敏感元件，它的功能是探测被测参数的变化。但是，传感器的输出信号一般都很微弱，还可能伴随着各种噪声，需要用测控电路将它放大，剔除噪声、选取有用信号，按照测量与控制功能的要求，进行所需演算、处理与变换，输出能控制执行机构动作的信号。在整个测控系统中，电路是最灵活的部分，它具有便于放大、便于变换、便于传输、便于适应各种使用要求的特点。测控电路在整个测控系统中起着十分关键的作用，测控系统、乃至整个机器和生产系统的性能在很大程度上依赖于测控电路。

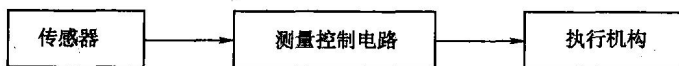


图 1-1 测控系统的组成

## 1.2 对测控电路的主要要求与特点

对测控电路的主要要求可概括为精、快、灵、可靠。这也是测控电路的主要特点。



### 1.2.1 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、推进科技发展的基础，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。要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。特别要提出的是，随着科技的发展，需要进行测量、监控的领域越来越多，环境条件越来越复杂，天上、地下、高温、高压等，有许多情况下条件十分恶劣，要求电路能在恶劣的条件下保证高的测量精度，并补偿其他因素带来的误差。

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以一定特征，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更有效地抑制干扰。

2. 低漂移、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。特别是许多现代测控系统，需要在非常恶劣的温度条件下工作。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，采用能够对漂移进行自动补偿的电路；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，还有电路长期工作导致元器件的老化、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控制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及波形不失真，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，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

传感器的输出发生变化。从不影响前级的工作状态出发,要求电路有高输入阻抗。在一些领域的测量中,被测对象和使用的传感器输出电流的能力十分低,这要求电路有很高的输入阻抗。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,因此要求电路的输出阻抗与后级的输入阻抗相匹配。

### 1.2.2 动态性能好

动态性能好包括响应快和动态失真小。

生产的节奏在不断地加快,机器的运转速度在不断地加快,特别是在航天等高科技、快速变化的物理、化学、生物现象的研究和军事上,响应速度更关系到成功与否、战争的胜负。响应速度快已经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。

### 1.2.3 高的识别和分析能力

随着科技和生产的发展,需要测量的参数类别越来越多,参数的定义也越来越精确化。以最简单的情况圆的直径为例,传统的定义是对径两点之间的距离。这是由于过去主要只能进行静态测量,也由于对于圆的形状评定没有提出很高的要求。现代的定义是最佳拟合圆的直径,而最佳拟合圆又根据需要可以按不同准则确定。随着技术的进步和对于现象深入研究的需求,要求对于一个动态过程,对于一个波形进行细致的分析。

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,例如不同频率的信号。这些不同特征的信号可能由不同的源泉产生,可有不同的物理含义,通过对于这些信号的分析,可以了解许多现象,弄清许多机理。对于信号进行分析、辨别的任务首先落在测控电路身上,其次通过测控电路对信号进行转换,与计算机一起完成进一步的识别和分析。

为了适应在各种情况下测量与控制的需要,为了对于信号进行识别、分辨和分析,要求测控电路具有灵活地进行各种转换与计算的能力。

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,为了提高在信号传输中的抗干扰能力,为了便于与计算机连接,为了便于长期保存等,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,这时又需要进行数/模转换。

2. 电量参数的转换 模/数与数/模转换是信号转换的一种形式。为了满足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亿万倍以上。用大量程测量



微小的量值变化，往往达不到所需的灵敏度和分辨力，从而不能保证测量精度。用小量程测量大的变化量，容易引起饱和与显著的失真。为了适应测量、控制不同大小量值的需要，电路应根据信号的大小进行手动或自动的量程变换。

4. 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，求导数、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。在控制系统中经常需要 PID（比例/积分/微分）控制，以实现快速、稳定的闭环控制。

### 1.2.4 可靠性高

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，那么整个集成块可靠性仅  $0.9999^{10000} = 0.368$ ，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  $(0.9999^{10000})^{100} = 3.7 \times 10^{-44}$ 。诚然，在实际系统中，各个晶体管的工作可靠性不是相互独立，但是从这个例子也可以看到，系统规模越大，对单个器件的可靠性要求越高。

测控技术是科技发展的重要支柱，在现代生产中、在科学研究中、在国防上，需要探索的领域越来越多，应用领域也越来越广泛，天上、地下、水中、人体内部等。工作条件千变万化，有的非常恶劣，如高温、高速、高湿、高尘、振动、密闭、遥测、高压、高电压、深水、强场、易爆，等等。测控电路都要有适应性，而且能在这些条件下可靠地工作，从而对测控电路提出了更高的要求。

### 1.2.5 经济性好

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的要求情况下获得较好的性能。

## 1.3 测控电路的输入信号与输出信号

测控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，输入信号的类型也随之而异。主要可分为模拟式信号与数字式信号。测控电路的输出通常送到显示机构、执行机构或计算机。根据显示机构的不同，输出信号也可能为模拟信号与数字信号，分别实现模拟显示或数字显示。根据所选用的执行机构不同，也可能要求测控电路输出模拟或数字信号。计算机一般来说要求数字信号输入，但不少情况下将模/数转换板插在计算机内，这时输入到计算机的是模拟信号。实际中可以将计算机看做是测控电路的延伸。

### 1.3.1 模拟信号

模拟信号可分为非调制信号与已调制信号。

#### 1.3.1.1 非调制信号

非调制信号是指测控电路的输入信号 2 的大小、波形直接与被测量 1 的大小、波形相对



应，或者测控电路的输出信号 2 的大小、波形直接与执行、显示机构最终输出信号 1 相对应，如图 1-2 所示。一般要求信号 2 与信号 1 之间具有较好的线性关系。

利用压电传感器测量作用在物体上的力和利用热电偶测量温度时，传感器的输出信号，也即测控电路的输入信号为非调制模拟信号。以磁电式电表、示波器、笔式记录器作为显示机构、以直流电动机作为执行机构时，都要求测控电路的输出信号为非调制模拟信号。

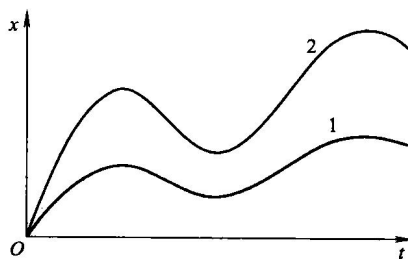


图 1-2 非调制模拟信号

### 1.3.1.2 已调制信号

为了提高信号的抗干扰能力，往往需要对信号进行调制。在精密测量中希望从信号一形成就成为已调制信号，因此常在传感器中进行调制。如图 1-3 中，用电感传感器测量工件轮廓形状时，若工件轮廓按图 1-4a 所示曲线变化，那么传感器的输出信号的幅值随工件轮廓形状变化，输出信号的波形如图 1-4c 所示，这是一个幅值按被测轮廓调制的已调制信号，称为调幅信号。信号的频率由传感器供电频率确定，这一频率称为载波频率（carrying frequency），具有载波频率的高频信号（见图 1-4b）称为载波信号（carrying signal），用以对载波信号进行调制的信号称为调制信号（modulating signal），而调制后的信号称为已调信号（modulated signal）。由于这里是幅值受到调制，称为调幅信号（amplitude modulated signal）。

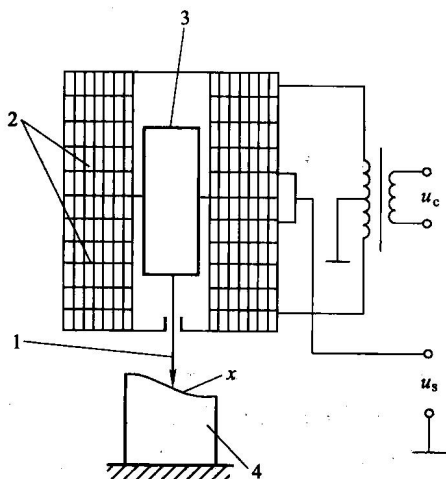
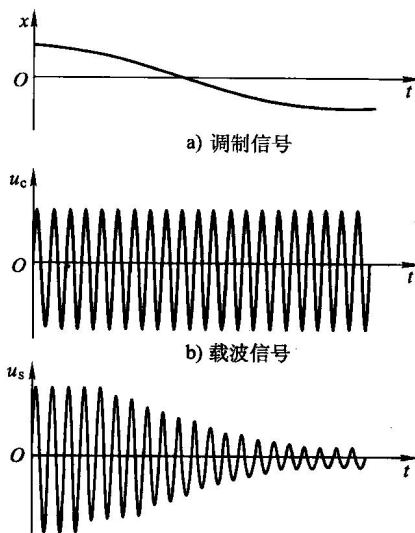


图 1-3 用电感传感器测量工件轮廓形状  
1—测杆 2—线圈 3—磁心 4—被测件



c) 调幅信号

图 1-4 调幅信号

用应变片测量梁的变形，并将应变片接入交流电桥。这时电桥的输出也是调幅信号，载波信号的频率为电桥供电频率，电桥输出信号的幅值为应变片的变形所调制。

除了对信号的幅值进行调制外，还可以对它的相位、频率进行调制，调制后的信号分别称为调相和调频信号。还可以对脉冲的宽度进行调制，脉冲的宽度受到调制的信号称为脉冲



调宽信号。这些将在第3章中详细介绍。

根据受控的执行机构需要，在某些情况下要求测控电路输出已调制信号。例如，交流伺服电动机的转速与控制电路输出信号的幅值成正比，控制电路输出的是调幅信号。用脉冲宽度控制的电动机需要脉冲调宽信号。

### 1.3.2 数字信号

#### 1.3.2.1 增量码信号

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。图1-5是迈克尔逊激光干涉仪光路，由激光器1发出的准直光经分光镜2分成两路，一路经分光镜2反射由参考反射镜3返回，另一路透过分光镜2，由安装在被测工作台5上的靶标反射镜4反射返回。在分光镜2处两路光重新汇合形成干涉。工作台5每移动半个波长，干涉条纹变化一个周期。光电元件6将干涉条纹的变化转换为电信号。这里不是根据光电信号的强弱确定被测工作台5的位移，而是根据光电信号的变化周期数确定被测工作台5的位移量 $\Delta L$ 。

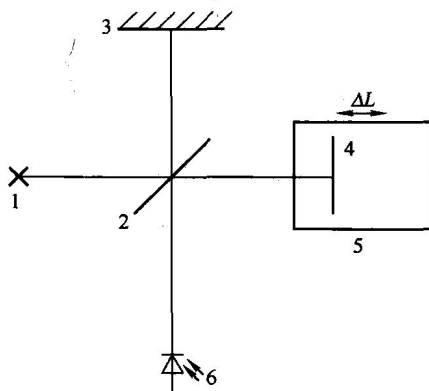


图1-5 迈克尔逊激光干涉仪光路

与这一类传感器连接的测量电路输入信号为增量码信号。增量码信号的特点是，被测量值的增量与传感器输出信号的变化周期数成正比。对输出模拟信号的传感器，传感器输出在输出非调制信号情况下信号的波形随被测量变化；在输出调幅信号情况下，信号包络线的波形随被测量变化。而增量码信号的波形不由被测量值或其增量决定，这是它与模拟信号的主要区别。

采用步进电动机为执行机构时，电动机的转角由输入的脉冲数决定，这时要求测控电路输出增量码数字信号。

#### 1.3.2.2 绝对码信号

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增量的信号。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。图1-6所示为一码盘，它的每一个角度方位对应于一组编码，这种编码称为绝对码。与绝对码传感器相连接的测量电路输入信号为绝对码信号。绝对码信号有很强的抗干扰能力，不管中间发生了什么情况，干扰去掉后，一种状态总是对应于一组确定的编码。

绝对码信号在显示与打印机构中有广泛的应用。显示与打印机构根据测控电路的译码器输出的编码，显示或打印相应的数字或符号。在一些随动系统中，执行机构根据测控电路输出的编码，使受

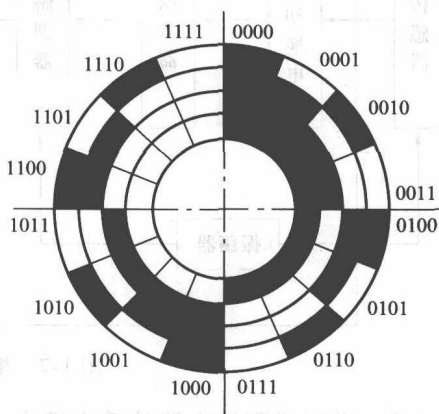


图1-6 码盘



控对象进入相应状态。这些都是要求测控电路输出绝对码信号的例子。

### 1.3.2.3 开关信号

开关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。与行程开关、光电开关、触发式测头相连接的测控电路，其输入信号为开关信号。

当执行机构只有两种状态时，如电磁铁、开关等，常要求测控电路输出开关信号。

## 1.4 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。

### 1.4.1 测量电路的基本组成

#### 1.4.1.1 模拟式测量电路的基本组成

图 1-7 是模拟式测量电路的基本组成。传感器包括它的基本转换电路，如电桥。传感器的输出已是电量（电压、电流、频率、相位信号等）。根据被测量值的大小，可按需要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，就无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，还需要进行运算和信号形式的转换。模/数转换是一种常用的信号转换。为了进行数字显示、数字控制都需要模/数转换。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，需要采用计算机，这时也需要模/数转换。图中振荡器、解调器、运算电路、信号转换电路和计算机画在点画线框内，表示有的电路中没有这些部分。

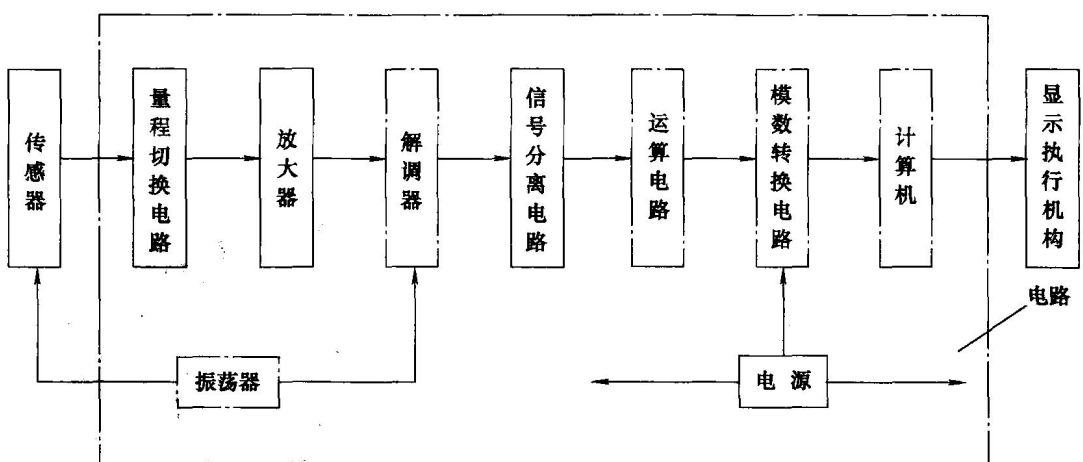


图 1-7 模拟式测量电路的基本组成

#### 1.4.1.2 数字式测量电路的基本组成

增量码数字式测量电路的基本组成如图 1-8 所示。一般来说增量码传感器输出的周期信

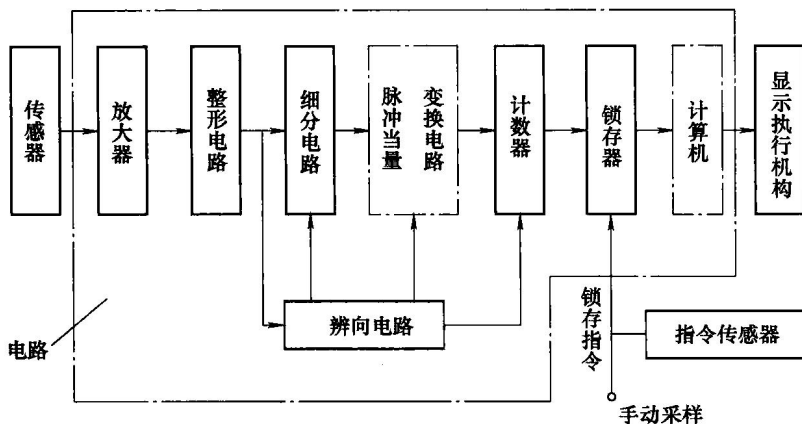


图 1-8 增量码数字式测量电路的基本组成

号幅值也是比较微小的，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。脉冲当量变换过去常由电路完成，而现在越来越多地由计算机完成。被测量增大或减小，增量码都作周期变化，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作加法或减法计数。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作加或减运算。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。

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。

## 1.4.2 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，这两类控制系统的组成有所不同。

### 1.4.2.1 开环控制

开环控制系统的基本组成如图 1-9 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，如通过一个电位器设定所需炉温。再利用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，可以让输出按所要求的规律变化。图中点画线框内所示部分为控制电路。

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。各种扰动因素都会使系统的传递函数发生变化，从而引起输出的变化。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，可以通过用传感器对扰动进行测量，通过测量电路在设定上引入一定的修正，以抵消扰动的



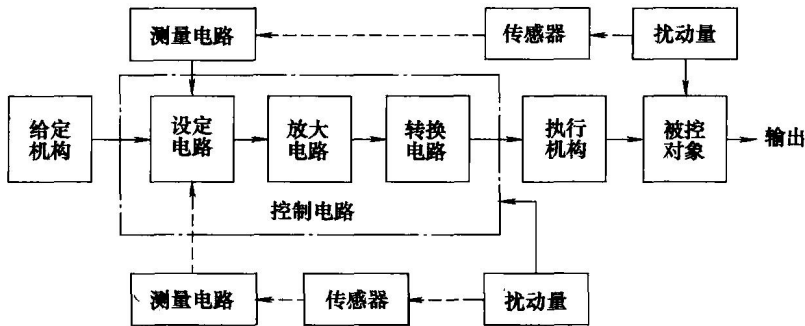


图 1-9 开环控制系统的基本组成

影响，如图中虚线所示。但是这种控制方式同样不能达到很高的精度。一是扰动因素可能作用在各个环节，很难完整地考虑各种扰动因素。二是测量扰动的不确定度会影响控制精度。三是扰动模型的不精确性影响控制精度。

#### 1.4.2.2 闭环控制

闭环控制系统的基本组成如图 1-10 所示。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反馈环节（包括传感器与相连接的测量电路）及比较电路的误差，包括作用在比较电路上的扰动影响。

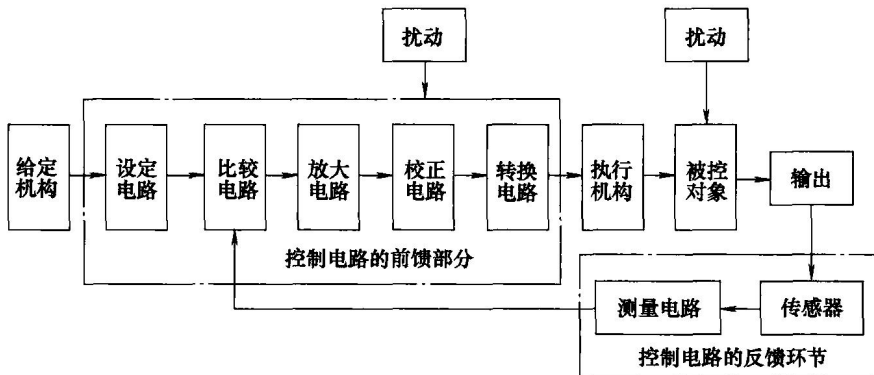


图 1-10 闭环控制系统的基本组成

在图 1-10 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。如果放大后直接输出，那么由于外界干扰的作用，发现输出不符合要求，反馈环节就会有一定的输出。在设定没有变化的情况下，比较电路会有一定输出，将被控对象的输出回调到设定状态。但是这种系统不能完全消除偏差，因为为了形成调节信号，必须要求反馈环节有输出，而这意味着被控对象的输出发生了变化。因为只有被控对象的输出发生了变化，反馈环节才会有输出，这种现象称为静差。为了消除静差，需要引入积分环节。当发现输出有变化时，反馈环节的输出发生变化，将输出量调节到设定值。输出量回到设定值后，反馈环节不再有输出，比较电路的输出也回到零，但是积分环节的输出不变，它能够抵消干扰的作用，使被控对象的输出量保持设定值。这种系统称为无静差系统。考虑到从发