

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。

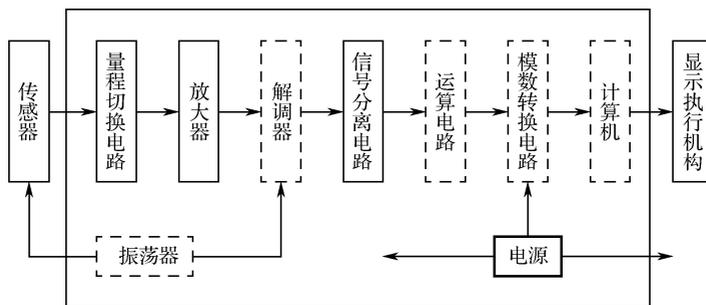


图 1-1 模拟式测量电路的基本组成

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，为了提高分辨率，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。

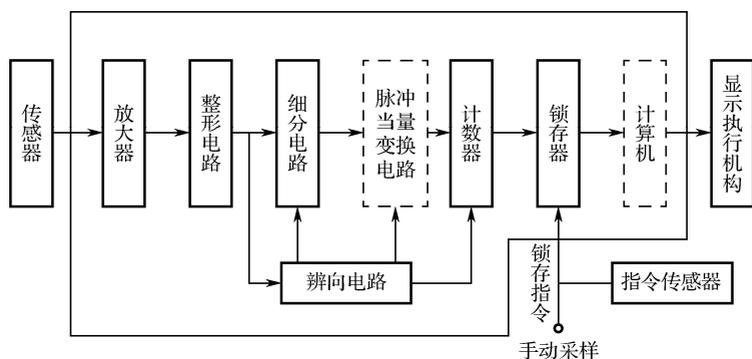


图 1-2 增量码数字式测量电路的基本组成

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。

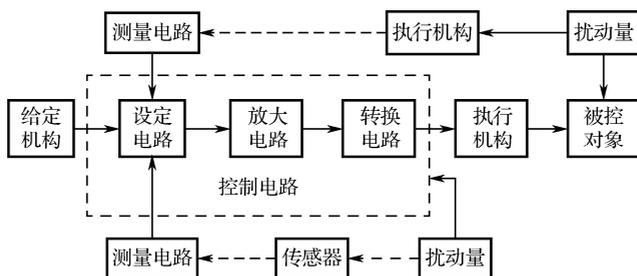


图 1-3 开环控制系统的基本组成

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。

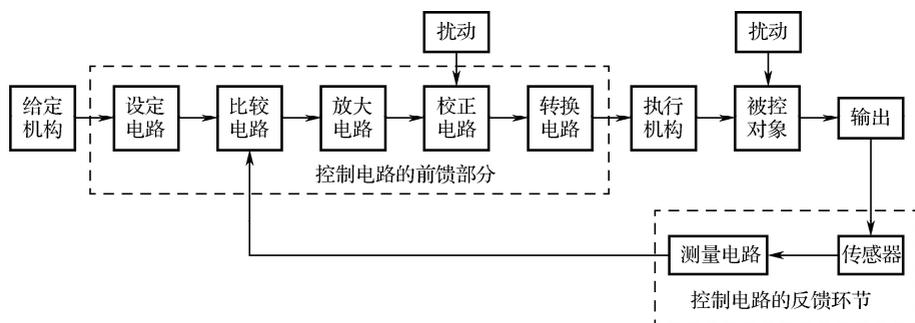


图 1-4 闭环控制系统的基本组成

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。

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。

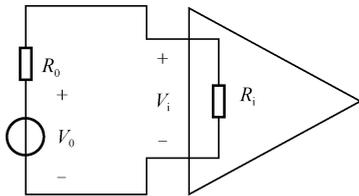


图 1-5 前级的输出阻抗对后级电路的影响

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。

2. 电场干扰及其抑制

电场的干扰主要来源于交流电源,其中 50Hz 的工频干扰最普遍。50Hz 的交流电场主要通过位移电流引入系统输入端及其引线,如传感器及其引线。交流电馈电线与引线之间都具有电容性质,因此 50Hz 的电场将通过容性耦合形成电场干扰。

1) 电场干扰的检测

由于电场干扰的主要来源是交流电馈电线,因而其频率固定(为 50Hz)。改变设备、传感器、输入引线或电路的放置位置,检测电路的输出,如果输出信号(50Hz)的幅值发生变化,即可初步判定存在电场干扰。如果在可能的干扰源与设备、传感器、输入引线或电路之间放置一块合适大小并接到大地的金属板,电路的输出信号(50Hz)的幅值发生变化,即可判定存在电场干扰的来源。

2) 电场干扰的抑制方法

抑制电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,移去已确定的干扰源。
- (2) 输入引线可以采用屏蔽线。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)用金属材料制成的屏蔽盒屏蔽起来。屏蔽线的屏蔽层和屏蔽盒要良好接地,否则屏蔽线或屏蔽盒不但不能够抑制电场干扰,反而使干扰更严重。
- (3) 尽量采用差分方式输入,输入引线采用屏蔽的双绞线或多股线。
- (4) 如果电场干扰源在仪器内部,尽可能采用屏蔽线替换原来普通的交流电馈电线。
- (5) 采用屏蔽电缆驱动技术。
- (6) 要求较高时,可采用悬浮电源(或电池)供电。
- (7) 采用光电隔离或磁隔离技术。

3. 电磁场干扰及其抑制

电磁场干扰的主要来源是各类无线电发射装置、各种工业干扰、无线电干扰和设备内部的高频电磁场干扰。电磁场干扰的特点是频率高,频率可以是固定频率,也可以是不固定的,作用距离远,幅值不稳定。

1) 电磁场干扰的检测

如果检测磁场干扰和电场干扰都不能确定干扰来源,而改变设备或电路的位置与方向时,输出信号有所变化,则可以确定是外部电磁场干扰。如果设备内部有高频工作的电路,采用金属盒盖住这部分时电路输出的幅值明显减小,则可以确定电磁场干扰来源于内部。

检测电磁场干扰的主要困难是将其与电路本身的自激振荡区别开来。一般而言,如果电路输出的幅值在采用检测磁场干扰和电场干扰的方法时都不改变,而在改变电路的某个参数(如在电路上并联上一个电阻或电容)时,电路输出的幅值或频率立即发生变化,这说明电路有自激振荡发生,应先排除自激振荡。

2) 电磁场干扰的抑制方法

对高频电磁场干扰抑制的主要措施有:

- (1) 电路或电源中采用高频滤波器或滤波电容。
- (2) 采用电磁屏蔽,一些高频仪器(如无线电遥测接收机)则应注意缩短内部布线,讲究

良好的接地与制造工艺, 振荡线圈应加屏蔽罩等。

(3) 抑制磁场干扰和电场干扰的方法都是抑制电磁场干扰的有效方法。

1.4.2 电路噪声

电路的噪声主要是指电阻(包括任何具有电阻的器件)的热噪声和晶体管(包括所有半导体集成电路中的晶体管)等有源器件所产生的噪声。电路噪声是永远存在的, 电路噪声测控部分设计的目的是尽可能地降低电路噪声。

1. 电路噪声的来源

仪器内部电路的噪声有前置放大器输入电阻的热噪声与晶体管等有源器件所产生的噪声。

1) 电阻热噪声

众所周知, 导体是由于金属内自由电子的运动而导电的, 导体内的自由电子在一定温度下, 由于受到热激发而在导体内部做大小与方向都无规律的运动(热运动), 这样就在导体内部形成了无规律的电流, 在一个足够长的时间内, 其平均值等于零, 而瞬时值就在平均值的上下跳动, 这种现象称为“起伏”。由于这样的起伏是无规则的, 因此, 在电路中常称之为起伏噪声或热噪声。起伏电流流经电阻时, 电阻两端就会产生噪声电压。由于噪声电压是无规律变化的, 无法用数学解析式来表达, 但是在一个较长的时间内自由电子热运动的平均能量总和是一定的, 因此就可以用表征噪声功率的噪声电压均方值来表征噪声的大小。由热运动理论和实践证明, 噪声电压的均方值为

$$\bar{V}_n^2 = 4kTBR \quad (1-2)$$

式中, k 为玻尔兹曼常数 ($1.372 \times 10^{-23} \text{J/K}$); T 为导体的热力学温度; R 为电阻; B 为与电阻 R 相连的电路带宽。

晶体管(包括运算放大器)等有源器件是仪器(或电子电路)本身噪声的主要来源之一。晶体管的噪声包括晶体管电阻的热噪声、分配噪声、散粒噪声和 $1/f$ 噪声。在半导体中电子无规律的热运动同样会产生热噪声, 在晶体二极管的等效电阻 R_{eq} 和三极管基极电阻 r'_{bb} 上的热噪声电压均方根值分别为

$$\begin{cases} \sqrt{\bar{V}_n^2} = \sqrt{4kTBR_{\text{eq}}} \\ \sqrt{\bar{V}_n^2} = \sqrt{4kTBr'_{\text{bb}}} \end{cases} \quad (1-3)$$

由于热噪声的功率频谱密度为 $P(f) = \frac{\bar{V}_n^2}{B} = 4kTR$, 所以电阻及晶体管的热噪声功率频谱密度是一个与频率无关的常数。也就是说, 在一个极宽的频带上, 热噪声具有均匀的功率谱, 这种噪声通常称为“白噪声”。

仅就电阻的热噪声而言, 由式(1-2)可以看出, 降低电路的工作温度, 减小电阻阻值和限制电路的带宽可以降低电阻的热噪声。但是, 降低电路的工作温度在绝大多数的情况下是困难的, 也是难以接受的。减小电阻阻值受电路设计的限制。唯一可接受的办法是把电路的带宽限制在一定的范围内, 即工作在信号的有效带宽。这样既可以降低电阻的热噪声, 又可以抑制带外的干扰信号。

假定有一个 $1\text{k}\Omega$ 的电阻, 在常温 20°C 工作, 带宽为 1kHz , 由式(1-2)可计算得到电阻的热噪声为 $0.127\mu\text{V}$, 这样小的值只有经过高增益放大才有可能在普通的示波器上观察到。但在

许多测控系统中,前置放大器的输入阻抗常常在 $10\text{M}\Omega$ 以上(由于信号源的输入阻抗也在这个数量级左右),这时计算得到的热噪声为 $12.7\mu\text{V}$ 。

实际上,任何一个器件(除超导器件外)不仅有电阻热噪声,还有其他的噪声,这些噪声与器件的材料和工艺有关,往往这些噪声有可能比热噪声更大,因而在电路的噪声设计时,选择合适的器件也是十分重要的。如精密金属膜电阻的噪声就比普通碳膜电阻小得多。

2) 晶体管的噪声

晶体管中不仅有电阻噪声,还存在分配噪声、散粒噪声和 $1/f$ 噪声。这些噪声也同样存在于各种以 PN 结构成的半导体器件(如运算放大器)中。

在晶体管中,由于发射极注入基区的载流子在与基极本身的载流子复合时,载流子的数量时多时少,因而引起基区载流子复合率有起伏,导致集电极电流与基极电流的分配有起伏,最后造成集电极电流的起伏,这种噪声称为分配噪声。分配噪声不是白噪声,它与频率有关,频率越高,噪声也越大。

在晶体管中,电流是由无数载流子(空穴或电子)的迁移形成的,但是各个载流子的迁移速度不会相同,致使在单位时间内通过 PN 结空间电荷区的载流子数目有起伏,因而引起通过 PN 结的电流在某一电平上有一个微小的起伏,这种起伏就是所谓的散粒噪声。散粒噪声与流过 PN 结的直流电流成正比。散粒噪声也是白噪声,它的频谱范围很宽,但在低频段占主要地位。

晶体管的 $1/f$ 噪声主要是由半导体材料本身和表面处理等因素而引起的。其噪声功率与工作频率 f 近似成反比关系,故称 $1/f$ 噪声,频率越低, $1/f$ 噪声越大,故 $1/f$ 噪声也称为“低频噪声”。

通常用线性网络输入端的信号噪声功率比 (S_i/N_i) 与输出端信号噪声功率比 (S_o/N_o) 的比值来衡量网络内部噪声的大小,并定义该比值为噪声系数 NF,即

$$\text{NF} = (S_i / N_i) / (S_o / N_o) \quad (1-4)$$

噪声系数 NF 表示信号通过线性网络后,信噪比变坏了多少倍。噪声系数也以分贝作为单位,用分贝作为单位时表示为

$$\text{NF} = 10 \lg [(S_i / N_i) / (S_o / N_o)] \quad (1-5)$$

显然,若网络是理想的无噪声线性网络,那么网络输入端的信号与噪声得到同样的放大,即 $(S_i/N_i) = (S_o/N_o)$,噪声系数 $\text{NF}=1$ (0dB)。若网络本身有噪声,则网络的输出噪声功率是放大的输入噪声功率与网络本身产生的噪声功率之和,故有 $(S_i/N_i) > (S_o/N_o)$,噪声系数 $\text{NF} > 1$ 。

根据网络理论,任何四端网络均可等效地用连接在输入端的一对电压、电流发生器来表示。因而,一个放大器的内部噪声可以用一个具有零阻抗的电压发生器 e_n 和一个并联在输入端具有无穷大阻抗的电流发生器 i_n 来表示,两者的相关系数为 r ,这个模型称为放大器的 e_n - i_n 噪声模型,如图 1-6 所示。

其中, V_s 为信号源电压; R_s 为信号源内阻; E_{ns} 为信号源内阻上的热噪声电压; Z_i 为放大器输入阻抗; A_v 为放大器电压增益; E_{no} 、 V_{so} 分别为总的输出噪声和信号。

有了放大器的 e_n - i_n 噪声模型,放大器便可以看成是无噪声的了。因而对放大器噪声的研究归

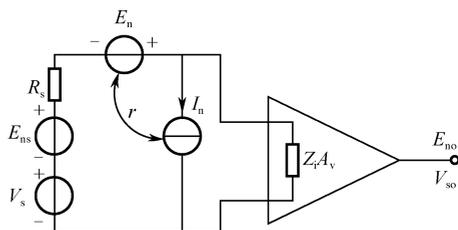


图 1-6 放大器的 e_n - i_n 噪声模型

结为分析 e_n 、 i_n 在整个电路中所起的作用就行了，这就大大地简化了对整个电路系统噪声的设计过程。通常情况下器件的数据手册都会给出这两个参数。实用时，可以通过简单的实验粗略地测量这两个参数。

2. 级联放大器的噪声

设有一个级联放大器，由图 1-7 所示的三级放大器组成。

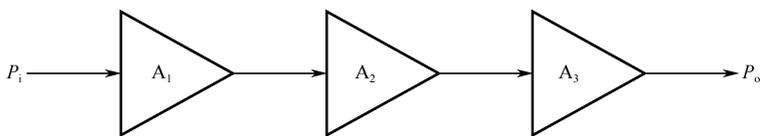


图 1-7 级联放大器简图

其中各级的功率增益分别为 K_{p1} 、 K_{p2} 、 K_{p3} ，各级放大器本身的噪声功率分别为 P_{n1} 、 P_{n2} 、 P_{n3} ，各级本身的噪声系数分别为 F_1 、 F_2 、 F_3 ， P_o 为信号源的噪声功率，则总的输出噪声功率为

$$P_o = K_{p1}K_{p2}K_{p3}P_i + K_{p2}K_{p3}P_{n1} + K_{p3}P_{n2} + P_{n3} \quad (1-6)$$

总的噪声系数 NF 为

$$NF = \frac{P_i}{K_p P_o} = 1 + \frac{P_{n1}}{K_1 \times P_{n1}} + \frac{P_{n2}}{K_1 \times K_2 \times P_{n2}} + \frac{P_{n3}}{K_1 \times K_2 \times K_3 \times P_{n3}}$$

若令 NF_1 为第一级噪声系数，可以得到总的噪声系数为

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{K_1} + \frac{NF_3 - 1}{K_1 \times K_2} \quad (1-7)$$

上式是三级放大器噪声系数的一般表达式。同理可以推出 n 级放大器的噪声系数为

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{K_{p1}} + \frac{NF_3 - 1}{K_{p1}K_{p2}} + \dots + \frac{NF_n - 1}{K_{p1}K_{p2}K_{p3} \dots K_{pn}} \quad (1-8)$$

可以看出，如果第一级的功率增益 K_{p1} 很大，那么第二项及其以后各项则很小而可以忽略，于是，总的噪声系数 NF 主要由第一级的噪声系数 NF_1 决定。因而在这种情况下，影响级联放大器噪声性能的主要是第一级的噪声，所以在设计中应尽量提高第一级的功率增益，尽量降低第一级的噪声。但如果第一级的功率增益不是很大，如第一级是跟随器，这时式 (1-8) 中的第二项不是很小，于是第二级的噪声也有较大影响而不能忽视。广义来说，如果认为耦合网络（传感器或传感器接口电路）也可以看成是一级的话，那么位于信号源与输入级之间的耦合网络由于其功率增益小于 1，使得式 (1-8) 中的第二项变得很大，因此 NF_2 成为主要噪声成分， NF_2 即输入级的噪声系数，此时它的大小就决定了整个 NF 的大小。所以，对于接在耦合网络的级联放大器来说，减小噪声系数的关键在于使本级具有高增益和低噪声。

1.5 测控电路的发展趋势

随着科技和生产的发展，测控电路发展十分迅速，其主要发展趋势可概括为：

(1) 优质化。为满足科技与生产发展需要，依靠半导体工业提供的可能性，一些具有低噪声、高稳定性、高频响、高可靠性、高输入阻抗的器件不断出现，一些能满足各种使用要求的

电路相继问世,并且性能指标不断提高、功能日益完善、价格下降。但是科技与生产又不断对它们提出新的要求。与此同时,一般说来一个器件、一种电路不可能在功能、性能、可靠性、价格上同时满足最佳要求,要根据使用要求合理选择。

(2) 集成化。集成化是电路发展的一个重要趋势。一方面是集成度越来越高,单个晶体管的尺寸已做到亚微米级,在一块芯片上集成几十万只、上百万只晶体管已成为现实,限制集成度的主要因素是引脚的安排。另一方面是集成范围越来越宽,集成电路的品种越来越多,各种专用集成块相继出现。

集成电路不仅体积小、功耗低,而且引线短、寄生因素小,容易达到较高精度与频响。集成电路的一个特点是有源元件容易制作,无源元件难以制作,电感、变压器等更难制作。另一个特点是参数不易精确,但一致性较好,因此采用差动电路较多。

(3) 数字化。数字电路不仅读数方便、客观,能较好解决量程与分辨力之间的矛盾,而且易于集成化,抗干扰能力强,便于记忆保存,便于与计算机连接,在测控电路中应用越来越广。但它不可能完全代替模拟电路,因为客观世界许多参数都是模拟量。

(4) 通用化、模块化。为了使仪器与测控系统具有更强的柔性,便于按需要扩展功能,同时有利于降低成本,要求电路通用化、模块化。

(5) 测控一体化。测量的目的不仅仅是为了检定产品质量、了解机器运动状态,而是为了控制机器的运动。闭环系统即是根据测量结果实现反馈控制的系统,是控制系统的主要发展方向。

(6) 自动化与智能化。现代控制系统不仅要求能自动控制,而且要求它能在复杂的情况下自行判断,具有自学习、自动诊断故障、自动排除故障、进行自适应控制,乃至自动生成新知识的功能,这也是测控电路发展的一个重要方向。

本课程是测控技术及仪器专业的一门专业课。通过本课程的学习使学生熟悉怎样运用电子技术来解决测量与控制中的任务。它不是一般意义上电子技术课的深化与提高,而要着重讲清如何在电子技术与测量、控制之间架起一座桥梁,实现二者之间语言的翻译与沟通,学会如何在测量和控制中运用电子技术,如何与光、机、计算机紧密配合,实现测控的总体思想,围绕精、快、灵和测控任务的其他要求来选用电路、设计电路。各种电子器件和集成电路的工作原理、构成在模拟和数字电子技术中讲述。本课程只注意它们的外特性,讲述其应用及如何构成所需的功能电路。

思考题与习题

- 1-1 为什么说在现代生产中提高产品质量与生产效率都离不开测量与控制技术?
- 1-2 试用你熟悉的例子说明测量与控制技术在生产、生活与各种工作中的广泛应用。
- 1-3 测控电路在整个测控系统中起什么作用?
- 1-4 影响测控电路精度的主要因素有哪些?而其中哪几个因素又是最基本的,需要特别注意的?
- 1-5 为什么说测控电路是测控系统中最灵活的环节?它体现在哪些方面?
- 1-6 测量电路的输入信号类型对其电路组成有何影响?试述模拟式测量电路与增量码数字式测量电路的基本组成及各组成部分的作用。
- 1-7 为什么要采用闭环控制系统?试述闭环控制系统的基本组成及各组成部分的作用。