

高等学校教材

测控电路

李刚 林凌 主编

高等教育出版社

014055244

TM930.111
09

高等学校教材

测控电路

Cekong Dianlu

李刚 林凌 主编



高等教育出版社·北京



北航

C1740824

TM930.111
09

014022544

材料科学等高等

内容提要

本书介绍了测控系统中电路的分析和设计方法,包括信号的检测、放大、处理、变换、显示、传输和功率驱动等内容。全书共13章,分别为测控电路概论、传感器与接口电路、信号放大、信号滤波、信号运算、信号线性变换、信号非线性处理、模拟-数字转换与数字-模拟转换、信号显示、功率驱动、生物医学信号检测、信号遥传、测控系统实例。本书特别注重反映现代电路的新进展,包括新技术、新器件和新方法。本书重视理论联系实际,全面考虑系统性,注意教材在全面提高学生的素质与能力方面的重要作用。

本书可以作为测控等机电类专业的本科教材,也可作为高等职业教育教材,还可供从事测控系统研发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

测控电路/李刚,林凌主编.--北京:高等教育出版社,2014.7

ISBN 978-7-04-039383-5

I. ①测… II. ①李… ②林… III. ①电气测量-控制电路 IV. ①TM930.111

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第052131号

策划编辑 王勇莉

责任编辑 王勇莉

封面设计 于文燕

版式设计 童丹

插图绘制 杜晓丹

责任校对 刘娟娟

责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 三河市骏杰印刷厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 25.25
字 数 460千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2014年7月第1版
印 次 2014年7月第1次印刷
定 价 39.20元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 39383-00

前 言

测控电路,顾名思义就是研究测控系统中的电路问题。现代测控系统的含义,已不仅仅局限于工业领域中的测控系统,而是包括科学研究、农业、医学和日常生活等各个领域中的测量与控制系统,这些测控系统包括各式各样的仪器仪表、控制装置,涉及人类生活的方方面面。许多测控系统是一些设备中的核心,如智能洗衣机、空调和数字化电视机中的控制系统。现代测控系统已无一例外地采用电子技术作为其基础。

现代科学技术的迅猛发展,用“日新月异”来形容毫不夸张。特别是电子技术的发展,已令人目不暇接。虽然本人从事电子技术方面的教学和科研已20多年,主持和参与30余项有关测控系统的科研和新产品开发工作,但一直注视着电子技术的发展,艰难而又奋力地追踪电子技术的进展。反观目前的教材,由于种种原因,都在不同程度上存在如下一些问题:

1. 严重滞后于电子技术的发展。现代测控电路中的许多新进展不能在教材中得到反映。现代电路的新进展包括新技术、新器件和新方法。在测控系统中采用电路的这些新成果,有助于大幅度提高测控系统的性能和可靠性,降低成本,提高效率。

2. 理论脱离实际。以运算放大器为例,运算放大器是测控系统中最常用的器件之一。在现有的教材中,往往把运算放大器作为一个理想的器件,而不考虑其实际性能对所设计电路的影响。

3. 只见树木不见森林。在现有的部分教材中,往往只注重单元电路的分析,很少考虑电路前后级的联系,更没有考虑单元电路在整个电路中的地位与作用和从整个电路(系统)出发去考虑和设计电路。

4. 编写教材的出发点是基于“应试教材”的要求。严格说来,测控电路的教学目标应该是使学生能够掌握电路的设计能力,电路分析是过程、是手段而不是目的。遗憾的是,大多数的教材只点到“电路分析”为止。

5. 教材方便于“教”而不是“学”,更缺乏培养学生自学能力、激发学生学习主动性的考虑。教师和教材“教”给学生的知识是有限的,但如果培养了学生的学习能力、分析问题和解决问题的能力,学生所学到的知识将是无限的。

编写本教材的目的,也就是要试图解决上述问题。在充分考虑教材的系统

II 前言

性的基础上,尽量引入电子技术的最新进展,理论联系实际,既见树木又见森林,有整体电路的考虑也有具体电路分析,注重学生能力的培养。

现代科技发展最为迅速的领域莫过于微电子技术和计算机技术,而测控系统的核心技术也就是微电子技术和计算机技术,但受教材篇幅和教学学时数的限制,作者强烈感受到有很多内容没有能够放进本书中。但对于一些明显落后、没有多少启发和创新价值、也不会损坏教材系统性的、没有实际应用价值的内容,如采用电阻串、并联的方法修正传感器的非线性、采用模拟计算等方法实现波形变换以及细分电路等内容,本书有意识地排除在外。即便如此,在如何兼顾现实与发展、基础理论与实际应用、有限的篇幅与迅速扩展的内容上,作者仍然遇到巨大的困难,其中作者水平有限是最根本的原因,但希望抛砖引玉,以本书吸引众多的专家、学者、教师和同学的关注,相信会出现更理想的教材。

现代高等教育的一个发展方向是夯实基础、拓宽方向。本教材可作为测控电路、测控技术、精密仪器电路和生物医学电路等课程的教材。在学习该课程之前,学生应该先修电子技术基础、传感器技术和负反馈控制理论等课程。由于编写本教材的指导思想有了重大的改变,必然与现有的教学大纲、教学体系和教学方法有不同程度上的冲突。如与后续课程的衔接、课堂教授内容的选取、实验的安排等都需要教师根据不同情况精心考虑。

靳世久教授对本书进行了详细的审阅,提出了许多宝贵和中肯的意见,天津大学精密仪器与光电子学院的多位教授也给予了指导、帮助,为提高本书的质量做出了重要的贡献,作者借此机会对他们致以深深的谢意。

本书由李刚和林凌主编,熊慧副教授编写了第1章与第2章,郑羽副教授编写了第3章与第4章,曾锐利副教授编写了第5章与第6章,乔晓艳副教授编写了第7章与第8章,李晓霞副教授编写了第9章与第11章,李会艳副教授编写了第10章,丁茹副教授编写了第12章,王蒙军副教授编写了第13章,李刚和林凌教授对全书进行了统稿和整理。

由于编者的水平有限,又试图在教材编写的指导思想和内容上作重大改变,该教材必然存在着许多不足、甚至错误之处。敬请使用该教材的老师和同学提出批评和建议,以利于编者对该教材的改进和完善。编者借此机会向关心和使用本教材的老师和同学致以深深的谢意。

作者

2013年5月于天津大学

目 录

第 1 章 测控电路概论	1
1.1 测控系统的一般结构	1
1.2 测控系统的设计	4
1.3 测控系统中的噪声、干扰与误差	5
1.4 本课程的学习方法和要求	12
思考题与习题	13
第 2 章 传感器与接口电路	15
2.1 概述	15
2.2 热电阻的接口电路	20
2.3 电容传感器的接口电路	22
2.4 电涡流式传感器的接口电路	27
2.5 电位器式传感器的接口电路	29
2.6 差分变压器式传感器的接口电路	30
2.7 压阻式压力传感器的接口电路	33
2.8 压电晶体传感器的接口电路	34
2.9 光电二极管(光电池)的接口电路	35
2.10 现代智能型传感器举例	38
思考题与习题	51
第 3 章 信号放大	53
3.1 概述	53
3.2 同相放大器	63
3.3 反相放大器	65
3.4 基本差分放大器	66
3.5 仪用放大器	68
3.6 可变增益放大器	71
3.7 隔离放大器	73
思考题与习题	76
第 4 章 信号滤波	78
4.1 引言	78
4.2 滤波器的主要特性指标	80
4.3 滤波器的传递函数与频率特性	82

II 目 录

4.4 有源滤波器的设计	84
思考题与习题	124
第5章 信号运算	127
5.1 引言	127
5.2 加减运算电路	128
5.3 对数与指数运算电路	133
5.4 乘除与乘方、开方运算电路	137
5.5 微分与积分运算电路	140
5.6 特征值运算电路	152
思考题与习题	159
第6章 信号线性变换	161
6.1 概述	161
6.2 电压-电流变换器(VCC)和电流-电压变换器(CVC)	162
6.3 波形变换	168
6.4 电压-频率变换与频率-电压变换	170
思考题与习题	174
第7章 信号非线性处理	177
7.1 引言	177
7.2 电压比较器	177
7.3 限幅放大器	184
7.4 死区电路	186
思考题与习题	187
第8章 模拟-数字转换与数字-模拟转换	190
8.1 引言	190
8.2 模数转换器(ADC)	191
8.3 数模转换器(DAC)	204
思考题与习题	212
第9章 信号显示	215
9.1 引言	215
9.2 LED显示器	215
9.3 LCD显示器	221
思考题与习题	225
第10章 功率驱动	226
10.1 引言	226
10.2 普通晶闸管	227
10.3 双向晶闸管	229
10.4 晶闸管触发电路	232

10.5 全控型器件	232
10.6 固态继电器	237
10.7 功率控制电路	242
思考题与习题	272
第 11 章 生物医学信号检测	274
11.1 引言	274
11.2 生物电测量电极	278
11.3 心电信号检测与心电图机	286
11.4 神经系统电信号检测与脑电图机	299
11.5 生物电检测前置放大器的设计	309
思考题与习题	313
第 12 章 信号遥传	316
12.1 概述	316
12.2 遥传中的基本调制原理	317
12.3 多路复用技术	336
12.4 无线网络技术	339
思考题与习题	342
第 13 章 测控系统实例	345
13.1 概述	345
13.2 高精度生物阻抗测量系统	346
13.3 双平板式导热系数测定仪	354
13.4 电动车用无刷直流电机控制器	383
思考题与习题	390
参考文献	391



本章学习要点

1. 测控系统的作用和测控系统的构成。
2. 了解本课程与已学习的课程有什么样的关系,学习方法有何异同点。
3. 对测量系统而言,灵敏度取决于什么?放大器的增益与噪声,哪个是限制系统灵敏度的主要因素?
4. 正确理解单元电路分析与整体电路设计之间的关系及整体电路设计主要考虑的问题。
5. 掌握自上而下的系统设计方法和单元电路之间、单元电路与系统之间的关系。
6. 测控系统中噪声的来源、性质和抑制方法。
7. 本课程的学习方法和要求。

1.1 测控系统的一般结构

所谓“测控系统”,就是测量与控制系统的简称。广义的测控系统包括测量系统、控制系统和测控系统三种类型。测控系统不仅仅是用于工业领域,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以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。

人们在认识和改造自然界的过程中,要从各个方面,采用各种方法观察和研究事物的发展过程和规律,不可避免地要采用测量手段研究事物在数量上的信息。被测对象可分为电量和非电量。显然,相对于电量而言,非电量在种类和数量上都多而复杂。在许多领域需要测量的是非电量,如机械量、热学量、化学量、光学量、声学量和放射性剂量等。这些非电量都可以用非电的方法测量。但非

电方法的优越性远不如电测法,特别是在微电子技术和计算机技术飞速发展的今天,电测法更具有突出的优势:

① 极宽的测量范围。采取电子技术,可以很方便地改变仪器的灵敏度和测量范围。

② 电子测量仪器具有极小的惯性。它既能测量变化缓慢的量,又可测量快速变化的量。

③ 可以很方便地实现遥测。

④ 便于对信号进行各种运算、处理、显示和记录。

图 1-1 所示为测控系统的一般结构。

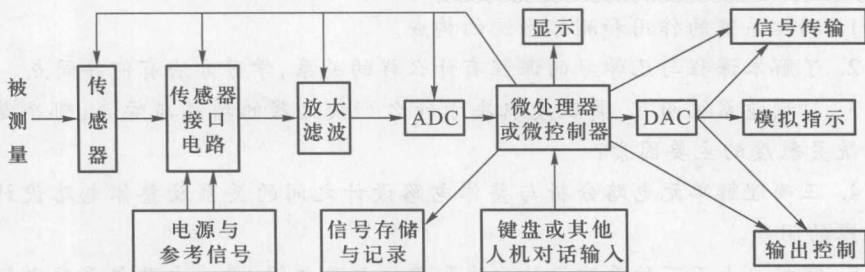


图 1-1 测控系统的一般结构

为实现非电量的电测量,首先要实现从非电量到电量的变换,这一变换是靠传感器来实现的。传感器接口电路是为了与传感器配合,将传感器输出信号转换成低输出电阻的电压信号以方便后续电路处理。一般说来,信号都需要进一步放大并滤除噪声。放大后的信号经模拟-数字变换后得到数字信号,以便于微处理器(μP , Micro Processor)或微控制器(μC , Micro Controller)处理。微处理器或微控制器是测控系统的核心,它主要有两个作用:一是对数字信号进行进一步处理并将信号输出显示、存储和控制。二是管理测控系统的各个部分以实现测控系统的智能化,即根据信号和测量条件的变化,自动地改变放大器的增益、滤波器的参数及其他的电路参数。

在选用合适的传感器之后,就要设计传感器的接口电路。从电子学的角度来看,不同的传感器具有不同的电特性和需要不同的驱动信号(也有的传感器不需要驱动信号),为取得更高的精度和最佳的性能,需要设计传感器接口电路,有关内容将在第2章介绍。

由传感器接口电路输出的信号往往幅值较低,因此需要将信号进一步放大,放大到后续电路所需要的幅值。关于放大器的分析和设计将在第3章介绍。

在信号的检测过程中,必然夹杂着许多的噪声和存在各式各样的干扰,滤除

噪声和抑制干扰是测控系统中必不可少的环节。模拟滤波器是滤除噪声的有效手段。关于滤波器设计的内容将在第4章介绍。

第5章将介绍信号运算电路,如微分器、积分器、对数和反对数运算等内容。

信号变换也是测控系统中经常要用到的电路。这部分的内容在第6章介绍。

广义的信号处理包括信号放大、信号滤波和信号比较等内容。从另一个角度来看,信号处理又分为线性处理和非线性处理。信号线性处理主要包括信号线性放大和信号滤波等内容;信号非线性处理则主要包括信号比较和信号非线性放大等内容。为方便起见,信号线性处理已分别在第3章和第4章中介绍。信号非线性处理的内容则放在第7章介绍。

测控系统几乎无一例外地使用微处理器或微控制器作为系统的核心,但 μP 和 μC 只能处理数字信号,因而在测控系统中,往往需要把模拟信号转换成数字信号。完成把模拟信号转换成数字信号的电路称为模拟-数字变换器(Analog to Digital Convertor),或简称模数变换器(ADC)。模数变换器及有关内容将在第8章讨论。

微处理器或微控制器的内容很多,将有专门的课程学习,键盘和人机对话输入也会在有关微处理器或微控制器的课程中学习。因而这部分的内容在本课程不予介绍。测控系统中的信号存储和记录已很少采用传统盒式磁带和描笔式记录仪,现在已普遍采用半导体存储器、磁盘和光盘来存储信号,采用针式、激光和喷墨打印机来记录信号。这部分内容很多,又往往是采用现成的商品,它们的工作原理和接口电路也会在微机类的课程中介绍,限于学时和篇幅,这些内容也不在本教材中讨论。

经微处理器处理的信号,可以输出显示或控制执行机构。往往有些显示或输出需要模拟信号,把数字信号转换成模拟信号的电路叫做数字-模拟变换器(Digital to Analog Convertor),或简称数模变换器(DAC)。数模变换器及有关内容也放在第8章讨论。

测量系统的主要目的是把所测量和处理的结果显示出来,这部分的内容将在第9章介绍。

一般说来,测控系统在放大、处理信号和微处理器输出的控制信号,或数模变换器的输出信号往往是小功率的信号,而所控制的对象又往往需要较大功率的驱动信号。实现这一功能的电路叫做功率驱动电路。第10章将讨论功率驱动电路。

生物医学信号的测量有着其特殊性。第11章向读者介绍了电子学在生物

医学测量中的小部分应用。

当今世界,网络已经引起社会、科技和生产的变革,不可避免地影响测控系统,使测控系统由传统的遥测、遥控拓宽到网络测控,第12章将从电路原理的角度讨论遥测、遥控和网络测控所需的基础知识。

为了给读者一个更完整、更具体的认识,在第13章中介绍了4种完整的测控系统,而且这些素材的选用也尽量考虑其代表性。

1.2 测控系统的设计

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:

1. 被测量的量其信号的大小与频率。
2. 要控制的量。
3. 系统的测量与控制的精度、性能。
4. 系统的使用条件。
5. 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。
6. 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下来。再以信号增益(通俗地讲: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1-2所示,后级放大器所得到的实际信号幅值为

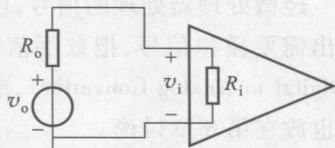


图1-2 前级的输出
阻抗对后级电路的影响

$$v_i = \frac{v_o R_i}{R_o + R_i} \quad (1-1)$$

相比之下,如果 $R_o = 0$, 则 $v_i = v_o$ 。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,或者后级电路的输入分布电容)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则是前级电路的负载。电路的负载过重,必然会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都会导致测控系统不能正常工作。

1.3 测控系统中的噪声、干扰与误差

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,有时我们把两者统称为噪声。在需要详细讨论噪声的来源与抑制方法时,把要讨论的电路以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,人们只有测得尽可能地趋近这个“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。

1.3.1 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、机械震动、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。一般说来,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逝,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逝,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 减少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,使其环路的方向与干扰磁场的方向平行。

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 50 Hz 的工频干扰最普遍,50 Hz 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 50 Hz 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 50 Hz)。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(50 Hz)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(50 Hz)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。注意屏蔽线的屏蔽层和屏蔽盒要良好地接地,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。屏蔽电缆驱动技术将在第 2 章中介绍。
- 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

如果采用检测磁场干扰和电场干扰都不能确定干扰来源,但是改变设备或电路的位置与方向时,输出信号有所变化时,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,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 在电路中或电源中,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(例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。

1.3.2 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作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地变化,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 为玻耳兹曼常数($1.372 \times 10^{-23} \text{ J/K}$); T 为导体的热力学温度; R 为电阻值; 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

$$\begin{cases} \sqrt{\bar{V}_n^2} = \sqrt{4kTB R_{eq}} \\ \sqrt{\bar{V}_n^2} = \sqrt{4kTB r_{bb'}} \end{cases} \quad (1-3)$$

由于热噪声的功率频谱密度为 $P(f) = \bar{V}_n^2 / B = 4kTR$, 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)可以给出,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情况下是困难的,是难以接受的。减少电阻阻值受电路设计的限制。惟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 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 工作,带宽为 1 kHz ,由式(1-2)可计算得到电阻的热噪声为 $0.127 \text{ }\mu\text{V}$,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 $12.7 \text{ }\mu\text{V}$ 。

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热噪声,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区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。