

电 子 线 路 及 应 用

〔美〕麻省理工学院 S. D. 森吐瑞 著
B. D. 韦德劳
清华大学应用电子学及电工学教研组 译

人 民 邮 电 出 版 社

ELECTRONIC CIRCUITS AND APPLICATIONS

Stephen D. Senturia

Bruce D. Wedlock

1975, by John Wiley & Sons, Inc.

内 容 简 介

本书是一本有关近代电子学概念和应用的导论性大学教材。作者是从使用者的观点编写的, 着眼于信号处理, 是把网络理论和电子技术作为一个统一的整体来处理的。

全书共分四个部分: 第一部分是电子技术语言的学习, 包括电路的一些基本概念和规律、非独立源、运算放大器、电路的储能元件和过渡过程。第二部分是电子器件, 包括材料的导电过程、 $p-n$ 结的基本理论、晶体管物理电子学、大信号和小信号放大电路。第三部分是线性电路和系统, 主要讨论线性系统的冲激响应、频率响应和信号处理。第四部分是应用, 包括调制解调、数字电路及其应用、噪声和仪器测量应用。

各章后面均附有练习和习题, 里面有不少很好的内容。

本书可用作大专院校师生的电子学参考书, 亦可作为非电专业的工程技术人员和科研人员的自学用书。

电 子 线 路 及 应 用

[美] 麻省理工学院 S. D. 森吐瑞 著
B. D. 韦德劳

清华大学应用电子学及电工学教研组译

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街 27 号

北京印刷一厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本: 787 × 1092 1/32

1981年4月第一版

印张: 21 页数: 336

1981年4月北京第一次印刷

字数: 485 千字

印数: 1—20,500 册

统一书号: 15045·总2459-无6129

定价: 2.15 元

译者序

在这广泛应用电子技术的时代，无论是哪个非电专业的工程技术人员和科研人员都需要掌握一些电子技术知识。但是对于电子技术知识的内容取舍问题和如何组织安排这些内容的问题上却存在着不同的看法。美国麻省理工学院电工程系教授 S. D. 森吐瑞和 B. D. 韦德劳写的这本书“电子线路及应用”反映了他们对上述问题的看法。

在内容取舍上，他们从电子设备使用者的观点出发，认为一般科技人员在实际工作中总要遇到信号处理的许多问题，所以书中内容着重于应用网络、系统和电子技术来处理信号，而对某些电子组件（如运算放大器和触发器等）的内部线路基本上不讲，只是把它们作为一个整体从外部来叙述其特性和功能。

在内容安排上，他们把网络理论与电子线路作为一个统一的整体看待。因此，他们是把理论的结果、元件的实用电路模型和电子技术在信号处理方面的应用紧密结合起来讲述的。

本书第十二、十三、十四章讲述线性系统的响应、频率响应和信号处理，取材精练、结构紧凑，讲得很出色，表明了他们着重于信号处理的观点。第四篇以较大的篇幅讲应用问题，反映出他们重视应用的观点。

本书考虑到读者是各个非电专业的科技人员，所以书中的起点很低；但是既要帮助读者应用电子技术，它所应到达的终点又不能不相当高；因此，书中内容的上升梯度大，但如果读

者具有较好的基础，则理解上不会遇到特殊困难。

我们认为本书内容与他们的教学方法对于我们是有一定参考价值的。

参加本书翻译工作的有：宗孔德、杨福生、吕森、周礼泉、梁毓厚、刘金铭、沈以鸿、金其莹、王鸿明、郭景藩、杨学正、钟长华、朱泽煌、胡宝振等同志。

限于译者水平，错误和不妥之处在所难免，请读者批评指正。

1979.9月

前 言

这本书是为那些想学习现代电工程原理并用这些原理来理解和实际使用各种电子元件、线路和仪器的读者写的。在写作上假定学生原来不具有电路理论或电子学的基础，所以本书对于实用电子学作了足够广泛和详尽的叙述，以便能够把电子线路和仪器直接应用到实验室和研究工作中去。由于这些应用含有信号处理中的日益复杂的概念，所以书中对网络理论、线性系统理论、调制与检波、噪声、防护与屏蔽和模拟与数字测试设备都作了实用的介绍。因此，本书可用来作为电工程专业入门的第一个课程的教科书；也可作为一学期或两学期的“科学家和工程师用电子学”概况课程的教科书；对于需要更多的电子学理论和实践基础知识的专家和工程师也可把本书作为自学的引进读物。

近十年来集成电路的发展使电子线路工艺有很多重要的改变。现在一个科学家或工程师不需要先掌握全部晶体管的复杂而细微的知识就能使用价廉的、可灵活运用集成电路工作组件去设计和作出非常复杂的线路。而且商品设备制造厂家已经使用这些组件把复杂的信号处理电路做成价格愈来愈低的插件，使用者可以买到大量的和各种各样的十年前还没有听到过的那些电子仪器。

本书是从作者们在 MIT（麻省理工学院）所讲授的为一个学期用的初等电子学课程演变而来的。听这个课程的学生（自从课程组成现在的样子以来已经超过一千人了）来自各个领

域——物理、生物、化学、机械、土木、化工和航空工程，他们之中从大学一年级学生到研究生都有，还有几个学医学和学法律的学生。许多大学一年级学生把这门课程当作 MIT 电气工程基础课程规划中的一门先行课。

为了使这么多听众能够应用现代集成电路电子学，我们采取了在几个方面与其他入门课程教材不同的教学方法。我们强调把下面各点紧密结合起来：

- (1) 以理想元件为基础的理论结果；
- (2) 实有器件的实际情况和代表这些器件的实用电路模型；
- (3) 应用(这些应用既利用器件又利用主要理论概念)。

把网络理论作为一种可以学到手的技能而不作为数学训练来处理。鼓励学生在书中的例题、仔细作过渐进安排的练习题以及来自实际的习题的帮助下，学习如何应用网络理论。对于本教材中较难的设计问题用黑体字题号来标志。在电阻网络和单一时间常数网络中都着重强调等效电路概念。由于运算放大器比晶体管更容易理解和应用，而且因为它已经在很大程度上代替了晶体管成为模拟电路中基本的标准单元，所以它是我们首先介绍的有源元件。其次在有上下文着重指出单独使用运算放大器不能工作的那些电路应用中，介绍二极管和晶体管（包括双极型和场效应晶体管）。当然，在这个过程中学生会遇到很多运算放大器中所用的电路结构。这样，学生就可以自动地分两步来理解运算放大器的特性和限制条件：首先把运算放大器本身当作一个理想元件，然后再把运算放大器作为一个由晶体管和二极管组成的复杂电路。

交流电路安排在详细讨论了运算放大器、晶体管和二极管工作于直流和似稳状态之后，而把单一时间常数电路的阶跃响

应作为一个例外（在第六章中介绍，因为这样才能及早讨论许多重要应用的例子）。在介绍小信号模型（第十一章）时必须要用到处理含有多于一个储能元件电路的方法以及处理比阶跃函数更复杂的随时间变化的波形，因此讨论放大器的频率响应就成为研究线性系统理论的那三章的工具，线性系统理论中包括复数阻抗和 S 平面方法（我们把这部分保持在不要求高深数学的水平）。然后在时域和频域中讨论叠加，频域中的叠加导致频谱的概念。频谱概念直接用于调制（第十五章）的讨论，并用于以后几章关于噪声和测量的应用。数字信号和电路（第十六章）的内容包含各种逻辑族、门电路、触发器的研究和把它们用于计数器、移位寄存器和组合逻辑电路。第十七和十八两章包含一种在初等教材中不常碰到的噪声和测量的知识，包括屏蔽和防护、器件噪声、模拟信号处理、模拟数字转换、采样数据和数字信号处理。尤其在小型计算机时代，这些内容对于现代电子技术使用者来说已经是必需的了，而且现在对于初学的人来说也是能理解得了的。

这本教材把必须先具备的基础知识保持在最低限度：初等微积分和相当于中学水平的物理。在MIT，这门课程除讲课和辅导课之外还包括适当的实验安排并大量地利用课堂表演。实验安排、建议的课程大纲和讲课表演的示例都写在教师手册里。

剑桥、麻萨诸塞州

一九七四年八月

S. D. 森吐瑞

B. D. 韦德劳

目 录

第一章 序言	1
--------	---

第一篇 学习语言

第二章 基本概念	10
第三章 线性电阻网络	34
第四章 非独立源	76
第五章 运算放大器	94
第六章 电容和电感	127

第二篇 电子器件

第七章 导电过程	169
第八章 二极管电路及其应用	195
第九章 晶体管的物理电子学	233
第十章 大信号晶体管电路	263
第十一章 小信号模型及电路	312

第三篇 线性电路和系统

第十二章 线性系统响应	361
第十三章 线性系统的频率响应	396
第十四章 线性系统中的信号处理	443

第四篇 应 用

第十五章 调制和检测	486
------------	-----

第十六章	数字电路及其应用·····	521
第十七章	噪声·····	573
第十八章	仪器测量的应用·····	607
索引·····		639

第一章 序 言

1.0 范围和目标

要说我们生活在电子时代那是一点也不夸张的。从到处都有的晶体管收音机至同样到处都有的数字计算机，我们每天都要遇到电子器件和系统。在日益发展的科学技术的社会的各个方面——不论是科学、工程、医药、音乐、维修甚至于侦察活动——电子学的作用都是巨大的而且还正在增长着。

本书的首要目标是广泛介绍近代电子技术的概念和使用。我们将连系各种应用来讨论这个领域的语言、概念和技术。我们选择的这些应用首先是适合在科学和工程领域中人们的需要，这些人必须学习怎样灵活地和创造性地运用电子技术。因此，虽然我们从电网络的最基本的方面开始，但我们的最终目的是教给学生懂得并能把电的和电子的元件联成系统来完成有用的和有意义的工作。

一般地说，我们要研究的总的任务可称之为“信号处理”。下面我们解释这个名词的意义。

1.1 信号处理

1.1.1 信号是什么

信号是一个物理变量，它的数量或它的随时间的变化包含

着信息。

例如在无线电广播中,信息可以是语言和音乐,信息也可以是诸如室内空气温度的物理量或数字数据(例如交易市场股票的记录数据)。在电系统中能运载信息的物理变量是电压和电流。^①所以,在本书中谈到“信号”时就指的是电压和电流。然而,我们所讨论的大多数概念可以直接用于其他各种运载信息的变量。不过,机械系统(以力和速度为变量)或水力系统(以压力和流量为变量)的性能常常可以用一个等效的电系统来模拟或表示。所以对于电系统性能的了解就为理解更广阔范围的现象提供了基础。

1.1.2 模拟信号和数字信号

信号可用两种不同形式运载信息。依靠电压或电流对时间

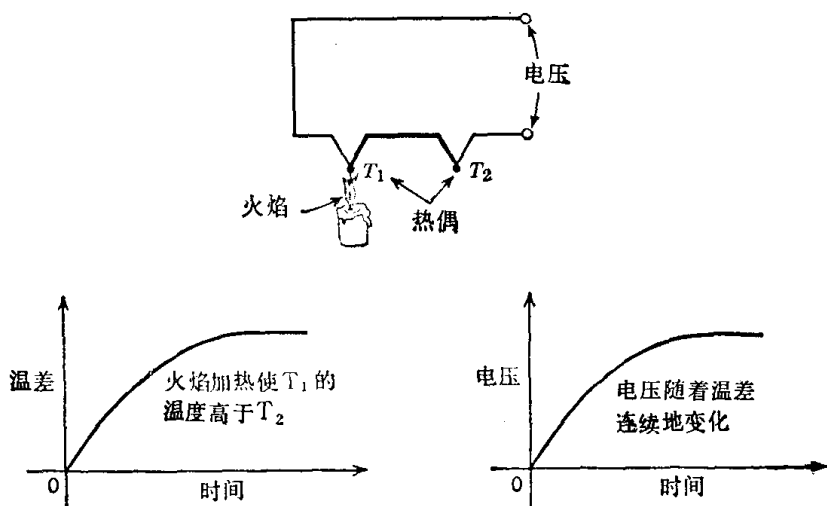


图 1.1 模拟信号的一个例子,加热一个热电偶使其温度高于另一个热电偶,便产生一个模拟输出电压

① 对完全不懂得这些名词的读者可预先简单地看一下下一章的 2.1 节。

的连续变化来运载信息的叫做模拟信号。图 1.1 所示的例子是一对热电偶,当两个结点处在不同温度之下的时候产生电压*。当两个结之间温差变化时,跨越两个热电偶的电压也随着改变。这样,电压就成了温差的模拟表示。

另一种信号是数字信号。数字信号在两个离散的范围取值。这样的信号用来表示“通—断”或“是—否”的信息。一个家庭用的热继电器发出数字信号来控制炉子。当室温下降到低于预定值时,热继电器开关闭合,使炉子打开。一旦室温上升到足够高的时候,开关断开,将炉子熄灭。通过开关的电流给出了温度变化的数字表示:“通”相当于“太冷”,而“断”相当于“不太冷”。

1.1.3 信号处理系统

信号处理系统是元件和装置相互连接起来的,它能接收一个输入信号或一组输入信号并对之进行某种方式的处理,或是提取信息或是改进信息的质量,并在适当时刻以适当形式将信息作为输出送出。

图 1.2 示出信号处理系统的组成部分。中间的两个圆圈代表两种类型的信号处理(数字的和模拟的),在二者之间的方框表示模拟信号转换成等效的数字形式(A/D =模拟—数字)和反过来,数字信号转换为相应的模拟形式(D/A =数字—模拟)。其余的部分包括输入和输出—使信号进入处理系统和把信号从处理系统送出去。

许多从物理系统中来的电信号是从称之为传感器的器件得到的。我们已经遇到过模拟传感器的一个例子——热电偶对。

* 一个热电偶是两种不同金属(例如铜与康铜)的结点。一对热电偶产生的电压可用来测量两结点之间的温差。

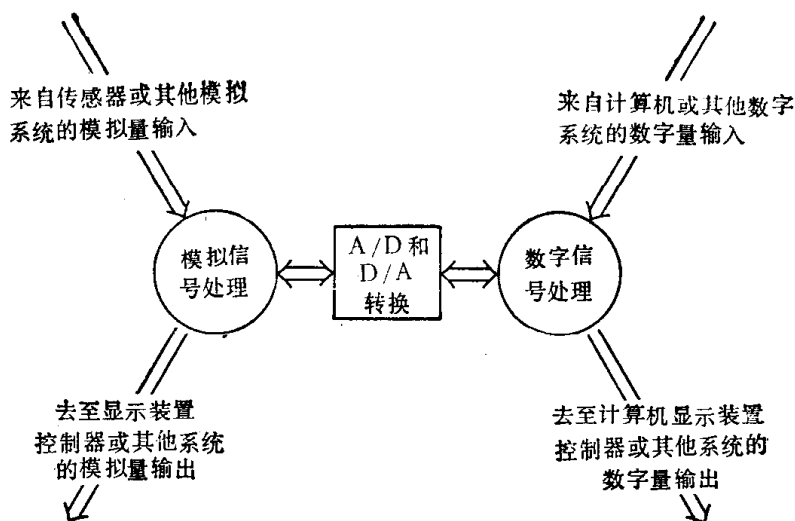


图 1.2 信号处理系统的组成部分

它将温差(物理变量)转换成电压(电的变量)。通常,传感器是把物理的或机械的变量转换成等效的电压或电流信号。然而大多数传感器与热电偶不同,它们需要靠某种形式的电激励来工作。

系统的输出可以有多种形式,这取决于输入信号中所包含的信息用来作什么。人们可能是要用模拟量的形式(例如用一个仪表,表的指针位置指示被测变量的大小)把信息显示出来,或者用数字的形式(用一套数字显示元件显示出被测变量相对应的数字)把信息显示出来。其他的可能形式还有把输出转换为声能(用扬声器),或者用输出作为另一个系统的输入信号,或者用输出作为一控制信号去引发某个动作。下面 1.2 节中给出的一些例子将说明上述的某些情况。

1.2 系统示例

1.2.1 一个通讯系统

我们将要说明的第一个系统是通讯系统。输入可以是语言、音乐或者数据，输入产生于某一地点，经过长距离有效地传送，然后忠实地还原为原来的输入。现在选的例子是大家所熟悉的调幅广播系统，图 1.3 是它的示意图。

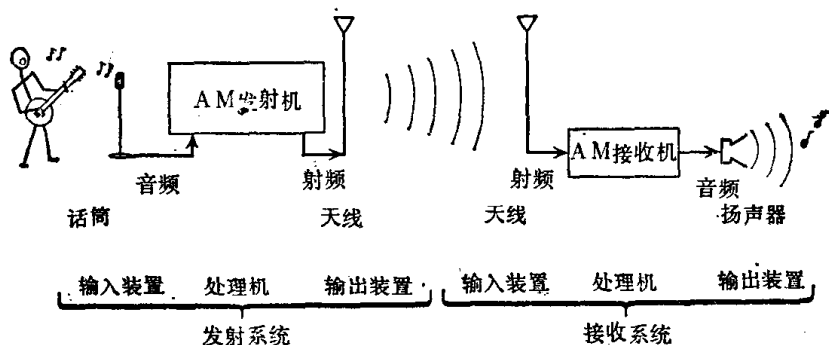


图 1.3 一个调幅广播通讯系统

图中字母 AM 代表调幅，它的意思是射频($r \cdot f$)信号的振幅或数值依照一个低频信号(音频，相当于可听见的频率)的大小来变化。在一个 AM 广播系统中发射机的作用是从一个输入器件(话筒)接收输入信号，用这个信号来控制射频信号(每个广播电台有自己特定的射频)的振幅，并用射频电流驱动输出装置产生电磁波射到空间去。接收系统包括输入装置(天线)，处理机(接收机)和一个输出器件(扬声器)。接收机的作用是放大或加强由天线收到的微弱信号，把所有其它电台的信

号滤掉而选出所要的射频信号，然后将音频信号从射频信号的振幅变化中复原出来，并用此音频信号驱动一个扬声器。

1.2.2 一个测量系统

第二个系统是一个测量系统。这个系统的作用是从适当的传感器中得到某一物理系统性能的信息并把这个信息显示给观察的人。图 1.4 所示的数字热电偶温度计就是上述系统的一个例子。

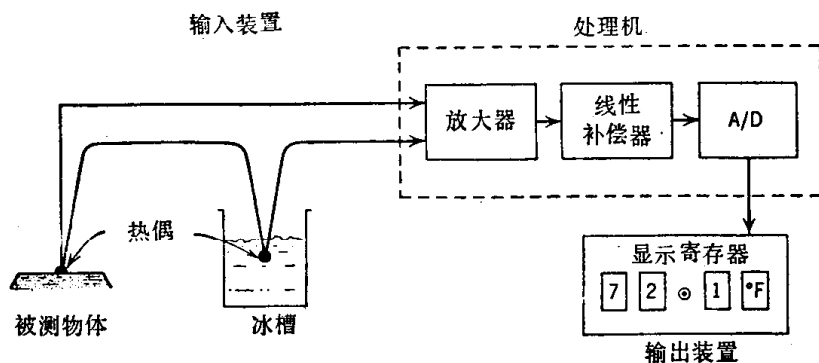


图 1.4 数字温度计的方框图

热电偶的两个结中，一个与被测温度的物体相接触，另一个浸于冰槽的冰水中以建立稳定的温度参考点。于是热电偶的两个结就把与被测物体和冰槽两者的温差相对应的电压送给处理机。因为热电偶的电压永远不会准确地正比于温差，所以为了使模拟电压准确地正比于温度，我们必须把一个小的校正电压加到热电偶的电压上。这个校正是线性补偿器的任务。从热电偶来的模拟电压先被放大(即使 i 增大)然后作线性补偿，然后转换为数字形式。最后，作为温度计输出在一个数字显示寄存器中显示出来。

通讯系统主要目的是经过传送使源信号忠实地再现，而测量系统的主要目的则是产生一个数值准确的数据。所以，在测量系统中，人们需要研究如何确定出和去除在处理过程的每一步中可能会加给信号的任何小的误差。

1.2.3 一个反馈控制系统

第三个系统是反馈控制系统。在这种系统里用反映输出特性的信息修正驱动系统的信号。图 1.5 中示出用一个热继电器来控制房间的温度。在这个情况下，热继电器包括一个确定室温的输入器件（一般是用一个当温度变化时产生弯曲的双金属片），一个能整定所要求温度的整定机构（具有定位点的刻度盘）和用双金属片动作控制炉子的机械开关。

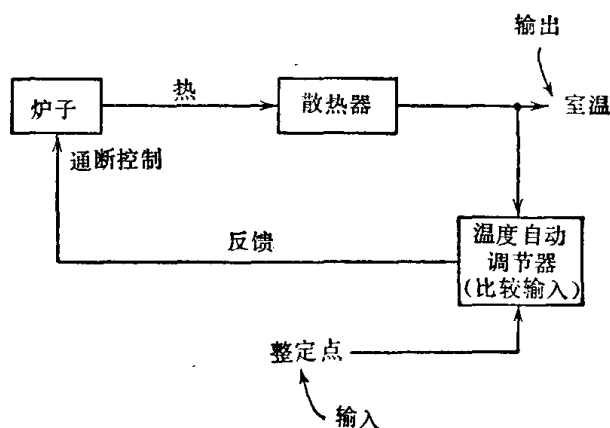


图 1.5 一个反馈系统

这一个大家熟悉的例子事实上除了一个开关之外没有包括电气元件。选这个例子是为了强调反馈概念。设想在图 1.5 中断开反馈线，即，设想没有管炉子“开”或“关”的机构。房间的温度将或者上升到最高（如果炉子老是燃烧着），或者下降到最

低(如果炉子老是熄灭着)。假设最高温度对人来说太热了,最低温度又太冷了,这就需要有控制器来管炉子的“开”和“关”。控制器可以是人,当他感觉冷的时候把炉子打开,当他感觉热的时候把炉子关掉。即便是这样一个简单情况,系统(包括着人)也构成一个反馈控制系统,因为关于输出的信息(即室温)被用来修正驱动信号(炉子的通-断开关)。热继电器不过是一个硬件,它自动完成的正是那个对温度敏感的人所做的:即,当温度下降到低于热继电器的整定点时炉子打开,反之炉子关闭。

还有许多其他反馈系统,包括用电子技术进行信号处理的系统。以后我们会遇到一些电子反馈系统。

1.3 模型化

本书内容用两条稍许不同的线索平行贯穿着。第一条线是研究真实的器件、真实的电路和真实的系统。第二条线是关于从真实器件中导出的抽象化的方式,即,研究对真实世界作了稍许理想化的模型。当我们研究电网络的基本定律和学习使用网络理论去分析理想化电路的性能时,我们将同时学习使用这些理想化电路去模拟或表示真实器件的性能。当我们研究用理想化的电子器件能完成什么功能时,我们将同时询问在现实世界中对于信号处理要求什么功能。到本书的末尾,当我们遇到真实器件的极限(例如,噪声的出现)和讨论这些极限对现实系统的设计怎样地给予约束时,两条线就紧紧地交织在一起了。尽管如此,从一开始就让学生意识到这种对偶方法对他们是有帮助的。

每一步发展中都会遇到准确与简单的矛盾。如果器件的模