

电子线路题解

第二册

[日] 斋藤正男 著

高远 译

于志成 校

高等教育出版社

电子线路题解

第 二 册

〔日〕斋藤正男 著

高 远 译

于志成 校

高等教育出版社

《电子线路题解》系根据日本大学电子线路课程的发展趋向，总结了著者的教学经验而编写成的。全书共两册。第一册为基础知识和线性电路，第二册为补充知识和非线性电路与时变电路。本书的习题是经过精心挑选的，著者企图不仅提供“思考的材料”，而且要教给“思考的方法”。

本书可供高等工科学学校无线电、电子类专业的师生和有关科技人员参考。

本书第十、十一章由于志成同志译。

责任编辑 译 骏 云

大学 电子回路演习[II]
课程

株式 昭晃堂 1981
会社

电子线路题解

第二册

「日」藤原正男 著

远 译

志成 校

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷三厂印装

开本850×1168 1/32 印张5 75 字数143,000

1987年7月第1版 1987年7月第1次印刷

印数 00,001— 8,165

书号 15010·0749 定价 1.35 元

译者的话

“电子线路题解”是根据日文《大学课程电子回路演习》译出的。作者斋藤正男教授是日本东京大学医用电子研究中心负责人，目前国际医用电子与生物工程学会主席。他写过十几本深受欢迎的书。

“电子线路题解”一书分第一、二两册。第一册为基础知识和线性电路，主要包括电子器件的物理性质、特性及其表示、网络的计算、有源二端与四端网络、实际放大电路等。第二册为补充知识和非线性电路与时变电路，主要包括非线性电路的分析、自激振荡电路、时变电路、调制与解调、数字电路基础、电子系统的设计等。本书可供高等工科学校无线电、电子类专业的师生和有关科技人员参考。

正如作者所说，本书是本著向学生不单提供“思考材料”，而且提供“思考方法”的精神而写的，所以在习题的选择和解答上，具有独特的见解和风格。深信本书会对我国的读者有所裨益。

.....

限于水平加上时间仓促，错误与不妥之处在所难免，希望读者批评指正。

高 远 1982.6 于哈尔滨工业大学

中译文版序言

本书是根据日本大学三年级和四年级学生的电子线路教材发展趋势，融进个人想法，并尽可能以新的盛行着的思考方法写成的。

近年来，电子技术的发展是急剧的。因此，在大学即使把实际技术教得非常详细，几年内也不能完全起作用。这种情况逐渐多起来了。对学生来说，与其教给他们一些基本应用的思考方法，还不如教给他们将来遇到大学没学过的技术革新时通过自己努力就能掌握的那些重要的思考方法。

如果从这种思考方法出发，那么电路、电子线路、控制电路等的教材不必有特殊的区别，也许把所谓的系统表示、分析、设计所有这些综合起来会好些，然而，这毕竟是一个极端的方法。在日本还存在与10年、20年前一点也没有变化的方式，也有一边详细地作电路图计算，一边进行电子线路讲授的大学。

尽管电子工程技术本身确实在发展，但与之相对应的有关教材究竟应该怎样还没有得出应有的结论。正因为如此，大学教材还不能满足需要。教材的内容必须考虑到中小学教育、学生的能力以及社会的要求等综合情况。

这次由于哈尔滨工业大学高远先生的努力，出版了本书的中译版本，我感到很高兴。在此谨对以高先生为首的有关各位先生表示深深的谢意，同时期待着适合中国实际情况的教材体系能更好更多地出现。

斋藤正男

1982.1 于日本东京

序 言

电子线路这门课的体系,近年来发生了很大的变化。当然,情况不全是一样。有的大学仅仅是将原来教材中的电子管改为晶体管而已。但我认为,既然社会上电子工业发生了巨大的变化,那么大学的教学内容也要有相应的变动。大学教育,特别是工学院本科教育,决不只是把高材生集中起来就算了,而首先是向他们传授基本的治学态度。如果这种观点成立的话,那么教师在本科教育中不单单向学生提供“思考的材料”,而且必须把“思考的方法”本身教给学生。而在本科教育中只教给时髦的方法,培养只懂得理论,“将来要算就会算”而实则不会算这样的学生是不行的。即便是基本教材,其内容也应该是与具体的、实际的知识相联系的。

从上述观点出发,我曾写了《线性电子线路》一书,出版后荣幸得到读者好评。与此同时,读者还希望有习题集。这次出版的电子线路题解分为第一、二两册,然而内容并不只限于线性电路。本书是大体上考虑了想学电子线路的本科学生的水平的。本来也没有一定要把本书和拙著《线性电子线路》并用的意图。本书可以单独作为教科书或参考书。但是,由于两者的内容程度相仿,因此,如果配合起来使用会更好些。

本书的习题是经过精心挑选的,所以读者要亲自演算,认真探讨。就这一点而言,本书与其它常见的习题集不同,它不只是光浏览一下题目和解答,就能掌握其中的共同模式。本书所列习题,每一道都独具特色,希望读者能认真研究。

本书的第一册为基础知识和线性电路,第二册为补充知识和非线性与时变电路。可能的话,最好按第一、第二册的顺序阅读,但已具备第一册基础知识的读者只读第二册也是可以的。

者通过本书增强实际能力后,切勿停滞不前,还要在解决实际问题的过程中不断充实提高。

本书本应早些出版,但由于各种原因而推迟了。

谨向在此期间给予大力支持的昭晃堂阿井国昭先生以及在原稿整理过程中给予帮助的工学士又吉正治先生表示谢意。

斎藤正男

1978年3月

目 录

第九章 非线性电路的分析

§ 9.1 非线性元件	1
§ 9.2 理想整流元件	4
§ 9.3 检波、整流电路	8
§ 9.4 非线性电路的计算	14
§ 9.5 非线性有源元件	19

第十章 自激振荡电路

§ 10.1 正弦波振荡器	25
§ 10.2 正弦波振荡器与非线性元件	28
§ 10.3 正弦波振荡器的分析	33
§ 10.4 用微分方程式分析	36
§ 10.5 张弛振荡	42

第十一章 时变电路

§ 11.1 时变元件	45
§ 11.2 时变电路的计算	48
§ 11.3 开关元件	54
§ 11.4 开关电路的应用	60

第十二章 调制与解调

§ 12.1 调幅	65
§ 12.2 调频	71
§ 12.3 脉冲调制	77
§ 12.4 频带与噪声	81

第十三章 数字电路基础

§ 13.1 二值逻辑	86
§ 13.2 逻辑函数的构成	90
§ 13.3 逻辑运算元件	93
§ 13.4 时序电路	98
§ 13.5 基本数字电路的应用	104

第十四章 电子系统的设计(一)

§ 14.1 传感电路	108
§ 14.2 信号的微分与积分	113
§ 14.3 信号的延迟	119
§ 14.4 信号的选择	123
§ 14.5 非线性处理 (1)	126
§ 14.6 非线性处理 (2)	131

第十五章 电子系统的设计(二)

§ 15.1 计数电路	137
§ 15.2 数字信号的存储与传输	142
§ 15.3 数字运算	150
§ 15.4 模拟信号的数字处理	156

第十六章 电子系统的设计(三)

§ 16.1 基本特性	163
§ 16.2 稳压电源	166
§ 16.3 其它电路	172

第九章 非线性电路的分析

以前学过的电子线路是由符合欧姆定律的所谓线性元件所组成的。与此相反,实际的电子器件,特别是半导体器件并不是线性元件。在实际的电路中,元件的非线性有时使电路状态不正常,有时也可积极地加以利用。在这一章里,拟学习有关非线性元件电路分析方法的一些基本知识。

§ 9.1 非线性元件

线性元件,例如线性电阻元件,其电压与电流的关系符合欧姆定律,即有

$$V = RI \quad (9.1)$$

其伏安特性为通过原点的一条直线。与此相反,非线性元件的伏安特性一般可用

$$I = f(V) \quad (9.2)$$

的函数关系表示,其伏安特性不是直线而是曲线。

〔习题 9.1〕 图 9.1(a)表示硅结型二极管的伏安特性。试将其近似地表示为折线特性。

〔解〕 这个问题在第二章(习题 2.9)中已讨论过。考虑到图(b)所示的折线特性,可用下式表示:

$$I = 0 \quad (V < 0.7) \quad (9.3)$$

$$I = 0.6(V - 0.7) \quad (V \geq 0.7)$$

〔习题 9.2〕 用上题的二极管组成如图 9.2(a)所示的电路,试通过计算并作图,求出二极管的工作点。

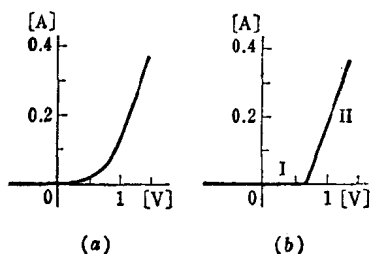


图 9.1

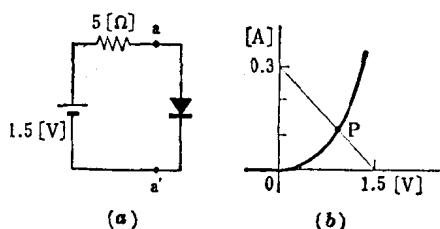


图 9.2

〔解〕 作图时要考虑到图(a)电路 a-a' 两端 向左右看进去的伏安特性。向右看进去的特性可由式(9.3)给出。向左看进去的特性可用式

$$V = V_0 - RI \quad (9.4)$$

给出 ($V_0 = 1.5\text{V}$, $R = 5\Omega$)。将这两个特性重合作图, 则得图(b), 其交点 P 就是所确定的工作点。P 点为 $V = 0.9\text{V}$, $I = 1.2\text{A}$ 。

如果单靠计算来求工作点, 将会使解答变得烦琐。那就是把图 9.1(b) 的折线特性分为 I、II 两个区域, 它们可分别用式(9.3)的二个式子表示。二极管究竟工作在哪个区域是不清楚的。首先假定工作在区域 I, 则把式(9.3)的第一式与式(9.4)联立, 可解得 $V = 1.5\text{V}$, $I = 0\text{A}$ 。这与该区域的条件 $V < 0.7\text{V}$ 不符, 所以不是解。

其次, 假定工作在区域 II, 把式(9.3)的第 2 式与式(9.4)联立, 可解得 $V = 0.9\text{V}$, $I = 1.2\text{A}$ 。这与区域 II 的条件是一致的, 所以是问题的解。

〔习题 9.3〕 在图 9.3(a) 中, N 为具有如图(b)所示的伏安特性的电阻元件。当电压源 V_0 取各种不同的数值时, 试问该元件的工作点如何变动?

〔解〕 由图(b)可见, 其解的数目如下:

若 $V_0 < 1V$, 为 1

若 $1 < V_0 < 2V$, 为 2

若 $V_0 = 2V$, 为 1

若 $V_0 > 2V$, 为 0

还有, $V=1V$ 时 $I=\infty$, 并且, 元件也许遭到损坏.

〔注〕 在这种非线性电路中, 有时不存在工作点; 即使存在工作点, 也非一般.

〔习题 9.4〕 有个伏安特性用下式

$$I = V^3 - 6V^2 + 9V \quad (9.5)$$

表示的非线性元件. 上式大致描述了该元件的伏安特性. 在该元件上, 把小信号电压与偏压叠加给出时, 试问小信号的特性将怎样呢?

〔解〕 令 $V = V_0 + v$, $I = I_0 + i$, 其中 V_0 , I_0 为偏压与偏流, v, i 为小信号电压与电流. 将其代入式(9.5), 利用关系式

$$I_0 = V_0^3 - 6V_0^2 + 9V_0 \quad (9.6)$$

并忽略二次以上的微小项, 则可得

$$i = (3V_0^2 - 12V_0 + 9)v \quad (9.7)$$

即对小信号而言, 这个元件作为电导 $g = 3V_0^2 - 12V_0 + 9$ 的线性元件工作.

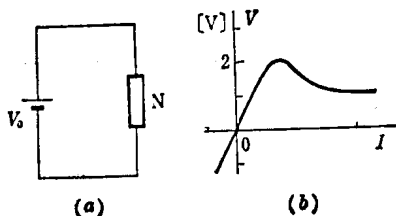


图 9.3

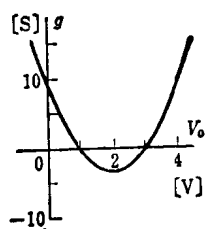


图 9.4

〔注〕 线性化电导, 随偏压 V_0 值的变化如图 9.4 所示。将非线性元件线性化时, 电导会出现负值。这就是在第一册中曾说明的负阻有源元件的原理。

〔习题 9.5〕 在图 9.5(a) 的电路中, 令 N 为上题所述的元件, 并给定偏压源 V_0 与小信号源 v_1 , 试计算电压传输比 v_2/v_1 。

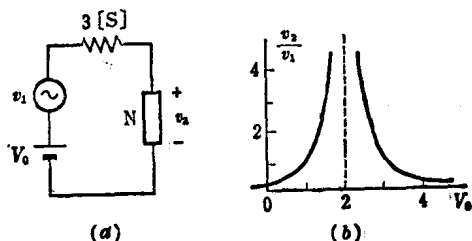


图 9.5

〔解〕 对小信号而言, 可用上题的等效线性电导代替。由图即可得知:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{g_0}{g_0 + g} \quad (9.8)$$

($g_0 = 3S$)。若将 g 用 V_0 表示并进行计算, 则得电压传输比为

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{V_0^2 - 4V_0 + 4} \quad (9.9)$$

电压传输比随 V_0 的变化曲线如图 9.5(b) 所示。

§ 9.2 理想整流元件

在非线性元件中, 整流元件是经常用到的。实际上, 整流元件就是特性如图 9.1(a) 所示的二极管。在理想状态, 特性如图 9.6(a) 所示。这是一个只考虑单向流过电流的元件, 称之为理想整流元件。理想整流元件的特性有如图 9.6(a) 的两个折线部分(I, II), 部分 I ($V > 0, I > 0$) 为正向(导通)状态, 部分 II ($V < 0, I = 0$) 为反向(截止)状态。总之, 可以说, 整流元件用短路代替时, 电流

沿正方向流通,为正向状态;用开始代替时,要在负方向上加电压则为反向状态。

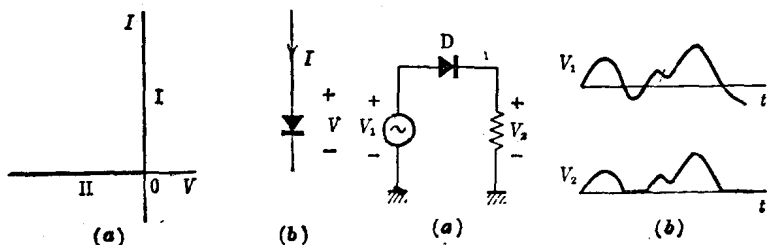


图 9.6

图 9.7

〔习题 9.6〕 用理想整流元件 D , 组成如图 9.7(a) 电路。试问输入波形与输出波形的关系如何?

〔解〕 在这个电路中, 显然, V_1 为正时, D 处于正向; V_1 为负时, D 处于反向。因此, V_1 为正时, $V_2 = V_1$; V_1 为负时, $V_2 = 0$ 。波形之间的关系如图 9.7(b) 所示。

〔习题 9.7〕 图 9.8(a) 所示电路中, D_1 、 D_2 是理想整流元件。试问输入波形 V_1 、 V_2 与输出波形 V_3 的关系如何?

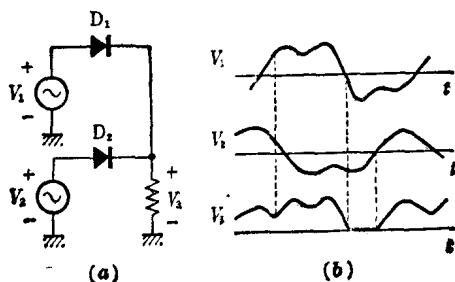


图 9.8

〔解〕 V_1 、 V_2 均为负时, 则 V_1 、 V_2 对输出 V_3 没有影响。这时与上题情况相同。假定在某一时刻, $V_1 > V_2 > 0$, D_1 处于正向状

态, D_2 处于反向状态。如果 D_1 用短路, D_2 用开路代之, 则有 $V_3 = V_1$ 。这是由于在 D_1 位置上通过正向电流, 而 D_2 承受反向电压, 才作如上考虑。否则, 若 D_1 、 D_2 状态考虑为其它组合情况时, 必然产生矛盾。

$V_1 < V_2$ 的状态亦同样, 使得 $V_3 = V_2$ 。结果, V_1 、 V_2 、 V_3 的关系则如图 9.8(b) 所示。 V_3 常常等于 V_1 、 V_2 与 0 中的最大值。

〔习题 9.8〕 在图 9.9(a) 所示电路中, V_1 由 0 逐渐增加时, 试问 V_2 将如何变化?

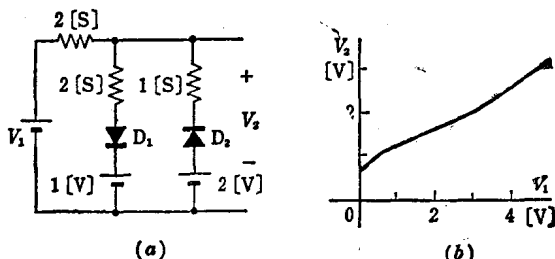


图 9.9

〔解〕 V_1 逐渐增加时, V_2 也逐渐增加, 而且

若 $V_2 \geq 1 V$, 则 D_1 处于导通状态,

若 $V_2 \leq 2 V$, 则 D_2 处于导通状态,

结果, V_2 可有以下几种情况:

(1) 若 $V_2 < 1 V$, 则 D_1 截止, D_2 导通*, 并且

$$V_2 = \frac{2V_1 + 2}{2 + 1} = \frac{2}{3}(V_1 + 1) \quad (9.10)$$

求得该式成立的范围为 $V_1 < 0.5$ 。

(2) 若 $1 \leq V_2 \leq 2$, 则 D_1 与 D_2 都导通, 并且

$$V_2 = \frac{2V_1 + 2 + 2}{2 + 2 + 1} = \frac{2}{5}(V_1 + 2) \quad (9.11)$$

* 用凯尼-密尔曼定理(见第一册习题 4.10)是方便的。

求得该式成立的范围为 $0.5 \leq V_1 \leq 3$.

(3) 若 $2 < V_2$, 则 D_1 导通, D_2 截止, 并且

$$V_2 = \frac{2V_1 + 2}{2 + 2} = \frac{1}{2}(V_1 + 1) \quad (9.12)$$

求得该式成立的范围为 $3 < V_1$.

综合上述情况, 则可得图 9.9(b).

〔习题 9.9〕 图 9.10(a) 所示电路中, D 是理想整流元件, A 是第八章中曾经说明的运算放大器。试问这个电路的输入输出特性如何?

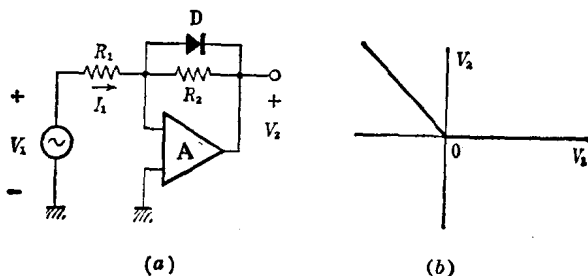


图 9.10

〔解〕 如第八章所述, 运算放大器是高输入阻抗、低输出阻抗的高增益反相放大器。在其正常工作状态下, 输入电流与电压几乎为零。 V_1 值无论取正还是取负, 总有 $I_1 = V_1/R_1$ 。若 I_1 为正, 则该电流通过 D , 因而 D 是导通的, 使 $V_2 = 0$; 若 I_1 为负, D 截止, 则 $V_2 = -R_2/I_1 = (R_2/R_1)V_1$ 。于是, 可得 V_1 与 V_2 的关系如图 9.10(b) 所示。

〔习题 9.10〕 定性说明图 9.11(a) 电路是怎样工作的(图中 A_1, A_2 为运算放大器)。

〔解〕 考虑图(a)的 A_1 部分, 无论 V_1 的极性如何, 放大器都

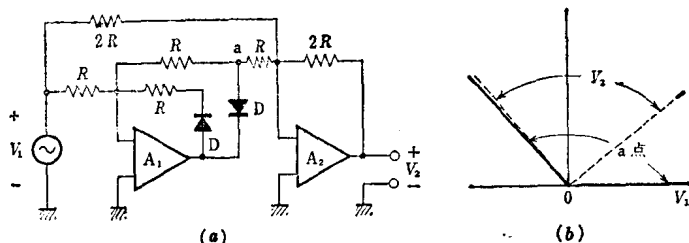


图 9.11

是工作在电压增益为 -1 的状态。但是,图中 a 点仅在 A_1 输出为负时才跟踪 A_1 的输出;若为正时则不能跟踪, a 点电位为 0 V 〔图(b)〕。因此,输出电压 V_2 有如下情况:

$$\begin{aligned} V_1 \geq 0 \text{ 时, } A_1 \text{ 输出为 } -V_1 \\ V_2 &= -V_1 - 2(-V_1) = V_1 \\ V_1 \leq 0 \text{ 时, } a \text{ 点电位为 } 0, \\ V_2 &= -V_1 \end{aligned}$$

V_1 与 V_2 的关系如图(b)所示。该电路作为全波整流电路而进行工作。

§ 9.3 检波、整流电路

利用整流元件的非线性特性,可由交流输入电压产生直流电压或功率。将交流变直流的变换作用称为整流或检波。

〔习题 9.11〕 在图 9.12(a) 中,假定 V_0 为正弦波 $A\cos\omega t$,试求在 V_2 中产生的直流分量。

〔解〕 V_2 的波形如图(b)所示,其直流分量为

$$V_{\text{DC}} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{4}}^{\frac{T}{4}} A \cos \omega t dt = \frac{A}{\pi} \quad (9.13)$$