电子电路读本 4

例题解析

电子电路

模拟篇

〔日〕尾崎 弘　谷口庆治　金田弥吉　橘 启八郎　浅田胜彦 著

林 鹏 译

科学出版社
www.sciencep.com

电子电路读本 4

例题解析

电子电路

模拟篇

〔日〕尾崎 弘　谷口庆治　金田弥吉　橘 启八郎　浅田胜彦 著

林 鹏 译

科学出版社

北 京

图字：01-2003-7839 号

内 容 简 介

本书是“电子电路读本”系列之一，本系列共分四册。本书作为电子电路的模拟部分，主要介绍各种电路的形式、半导体元器件及其基本电路、放大电路、反馈放大电路和振荡电路，以及运算放大电路和电源电路等，章末配有练习题及其解答，全书共有100多道练习题。

本书的特点是图文并茂、简明易懂，将相关的内容通过例题来讲解，以此避免读者在学习时的枯燥、乏味；此外，重点名词给出相应的英文词汇，有些重点名词还给出注释。

本书适合作为大专院校“模拟电路”的辅助参考教材，也可作为模拟电子技术人员的参考学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

例题解析电子电路——模拟篇/(日)尾崎弘等著；林鹏译.
—北京：科学出版社，2004
(电子电路读本)
ISBN 7-03-013170-3

Ⅰ.例… Ⅱ.①尾… ②林… Ⅲ.模拟电路-解题 Ⅳ.TN710-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 033030 号

责任编辑：王 炜 崔炳哲 / 责任制作：魏 谨
责任印制：刘士平 / 封面设计：李 祥

科学出版社 出版
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com
新蕾印刷厂 印刷
北京东方科龙图文有限公司 制作
http://www.okbook.com.cn
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2004 年 7 月第 一 版 开本：A5(890×1240)
2004 年 7 月第一次印刷 印张：7
印数：1—5 000 字数：198 000
定 价：20.00 元
(如有印装质量问题，我社负责调换〈新欣〉)

前　言

伴随着电气、电子技术的飞速发展，对该领域技术人员的要求越来越高。为了顺应这种要求，首先扎实地掌握电气类基础知识是十分必要的。模拟电子技术又是这些电气类基础的基础，适用于电子、通信、信息处理等诸多领域，为了全面地掌握这些知识，单纯死记硬背理论和定理公式是不够的，还应该培养知识的灵活应用能力和问题的分析理解能力。培养这些能力最行之有效的办法就是尽量多做练习题，巩固所学知识。

本书邀请长年工作在日本各大学电气信息类专业的优秀教师，组织编写，是一本面向大学、高等专科学校学生，用来培养能力的电子电路例题解析题典。但是，在编写初期，笔者感到仅仅用简单的说明和例题再加上问题答案的编写方式枯燥乏味，有一种汇编考试参考用书的感觉，深感不安（相信诸君大概都厌烦考试参考用书吧）。于是，在编写本书时注重如下面的(1)～(4)项，力争做到：本书不单单是一本习题集，而是一本用例题进行详细说明并配有大量练习题的教科书。

另外，笔者之间对原稿进行了多次的交叉校对和审核，尽量避免内容重复的同时，又努力消除表达方法的不一致及其他错误。总之，本书作为一本涉及从电路的基础理论到应用的学习用书，在编写的过程中，注意了以下几点：

(1) 对第1章线性电路（线性无源电路和线性电子电路）进行了详细缜密的阐述（这在同类书籍中尚不多见）。

(2) 对每个项目，首先从基础理论开始讲起，然后展示例题及其解答，使读者由浅入深地理解。

(3) 文章尽量做到简明易懂，专业术语附有注释。

(4) 每章最后列举了诸多练习题，并且在其章末附有答案。

本书共收罗近100道练习题，并且对基础理论进行了很好地总结。

综上所述，本书不仅可以作为培养实际能力的例题解析用书，也可以作为教科书或参考用书。

在执笔本书过程中，参考了大量的著作和论文，在此对这些著作和论文的作者，表示深深的谢意。

另外，对在本书出版过程中，给予鼎力协助的共立出版社的各位同仁，特别是深濑英弥先生，致以深切的谢意。

著 者

目　　录

第 1 章 电路及其形式

要点

本章介绍电路(线性无源电路和线性电子电路)及其操作方法展开论述,主要由六部分组成,各个部分的内容如下:

1.1 节,将针对导抗(导纳和阻抗)的定义和电源进行阐述。

1.2 节,将针对基本的定理及其应用进行阐述。

1.3 节,将针对二端口网络的矩阵表示进行阐述。

1.4 节,将针对二端口网络的连接方式进行阐述。

1.5 节,将针对电子电路的矩阵表示进行阐述。

1.6 节,将针对传递函数的计算方法进行阐述的同时,特别以 RC 三端电路为例子进行详细的说明。

如果将本章阐述的电路的基本操作方法熟练掌握,那么以后章节的诸多问题就迎刃而解了。

1.1 电路的导抗(阻抗和导纳)和电源

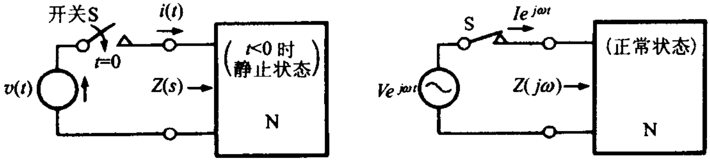
1.1.1 导抗(阻抗和导纳)

1. 基于拉普拉斯变换的导抗的定义

如图 1.1(a)所示,在线性无源时不变电路 N 中,当 $t=0$ 时刻外加大小为 $v(t)$ 的电压源,于是电流就变为 $i(t)$。

其中,设 $t<0$ 时,电路 N 处于静止状态[1]。这个时候,设 $v(t)$ 和 $i(t)$ 的拉普拉斯变换分别为 $V(s)$ 和 $I(s)$,它们的比为:

1) 静止状态(relaxed state):没有积蓄任何能量的状态,也就是说,电感(线圈)中没有电流流过,并且电容器中没有电荷积蓄的状态。



(a) t=0时外加电压源$v(t)$的情况 (b) 外加正弦波电压$Ve^{j\omega t}$后达到正常状态的情况

图 1.1 阻抗的定义

$$Z(s)\triangleq V(s)/I(s),(s=\sigma+j\omega) \tag{1.1}$$ [1)]

我们称 $Z(s)$为电路 N 的**阻抗**(impedance),它的倒数

$$Y(s)\triangleq 1/Z(s) \tag{1.2}$$

被称为**导纳**(admittance)。$Z(s)$和 $Y(s)$合起来称为**导抗**(immittance)。下面,我们将用 $W(s)$来表示导抗。

这样定义的导抗 $W(s)$中 $s=\sigma+j\omega$ 为复数变量,设

$$\sigma=0,\ W(s)=W(j\omega) \tag{1.3a}$$

此时,如图 1.1(b)所示,外加的

$$v(t)=Ve^{j\omega t} \tag{1.3b}$$

电压源达到正常状态时的电压和电流之比为

$$Z(j\omega)=\frac{V(j\omega)e^{j\omega t}}{I(j\omega)e^{j\omega t}}=1/Y(j\omega) \tag{1.3c}$$

【例 1.1】 试求图 1.2 所示的 LCR 电路的阻抗。

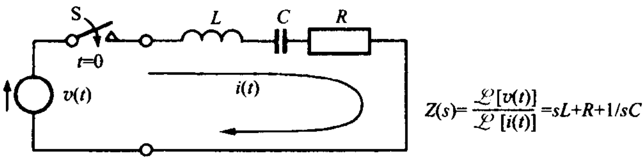


图 1.2 LCR 电路的阻抗

这个电路成立的微分方程式如下所示:

---

1) 符号$\triangleq$:例如 $A\triangleq f(x)$的意思是"把 $f(x)$设为 A"。

$$L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+Ri+\frac{1}{C}\int i\mathrm{d}t=v(t) \tag{1.4}$$

把这个式子进行拉普拉斯变换后，由于电路处于静止状态，初始电流和初始电荷都为 0，所以式(1.4)就变成下面的形式。其中，式(1.5b)和式(1.6b)为外加正弦波电压 $Ve^{j\omega t}$ 的情况。

$$(sL+R+1/sC)I(s)=V(s) \tag{1.5a}$$

$$((j\omega L+R+1/j\omega C)I(j\omega)e^{j\omega t}=Ve^{j\omega t}) \tag{1.5b}$$

$$Z(s)=V(s)/I(s)=sL+R+1/sC \tag{1.6a}$$

$$(Z(j\omega)=V(j\omega)/I(j\omega)=j\omega L+R+1/j\omega C) \tag{1.6b}$$

根据式(1.5a)可以求得电流 $i(t)$ 如下($\mathscr{L}^{-1}[X]$表示 X 的拉普拉斯反变换)。

$$\begin{aligned} i(t)&=\mathscr{L}^{-1}[I(s)] \\ &=\mathscr{L}^{-1}[V(s)/Z(s)] \end{aligned} \tag{1.7}$$ ◀

2. 基于傅里叶变换的导抗的定义

函数 $f(t)$ 的傅里叶变换 $F(j\omega)$ 定义为下面的形式：

$$(\text{傅里叶变换})\quad F(j\omega)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}f(t)e^{-j\omega t}\mathrm{d}t \tag{1.8a}$$

其中，$F(j\omega)$ 被称为 $f(t)$ 的频谱(spectrum)。如果给出 $f(t)$，要根据上式求出 $F(j\omega)$ 必须满足下面的条件：

(i) $f(t), f'(t)$ 为分段连续。

(ii) $\int_0^{\infty}|f(t)|\mathrm{d}t=M<\infty$ (有限确定)。

根据 $F(j\omega)$，可以求得 $f(t)$ 如下面所示：

$$(\text{傅里叶反变换})\quad f(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}F(j\omega)e^{j\omega t}\mathrm{d}\omega \tag{1.8b}$$

下面的事实，我们不证明，只做简单的阐述[1)]。

一般情况下，如果设函数 $f(t)$ 的拉普拉斯变换为 $F(s)$，那么将 $s=j\omega$ 代入得到的 $F(j\omega)$ 就和函数 $f(t)$ 的傅里叶变换一致。但是，即使拉普拉斯变换存在，傅里叶变换也不一定存在。相反，如果存在傅里叶变换 $F(j\omega)$，那么就一定存在拉普拉斯变换。此时将 $j\omega$ 换成 $s=\sigma+j\omega$ 代入得到的 $F(s)$ 就是函数 $f(t)$ 的拉普拉斯变换。

1) 通过考虑拉普拉斯变换和傅里叶变换的定义式的积分线路，就可以得到证明的结果。

在电路中，虽然多用 $V(s)$，$I(s)$，$Z(s)$ 等拉普拉斯变换的形式来表示，但也经常用 $s=j\omega$ 替代的 $V(j\omega)$，$I(j\omega)$，$Z(j\omega)$（也就是傅里叶变换的表达方式）来表示。在这种情况下，$Z(j\omega)$ 可以视为用 $v(t)$ 和 $i(t)$ 的傅里叶变换的比来定义的。

【例 1.2】 我们来考虑前面[例 1.1]的电路，也就是图 1.2 的电路的问题求解（求解 $i(t)$）。现在，由于电路处于静止状态，并且不发生自由振荡，因此可以只考虑受迫振荡的状态。

(i) 当 $v(t)$ 为正弦波，有 $v(t)=Ve^{j\omega t}$，$i(t)=Ie^{j\omega t}$。我们把这些代入式(1.4)中，可以得到

$$\left(j\omega L+R+\frac{1}{j\omega C}\right)Ie^{j\omega t}=Ve^{j\omega t} \tag{1.9}$$

所以

$$I=V/Z(j\omega),\ Z(j\omega)=j\omega L+R+\frac{1}{j\omega C}$$

$$i(t)=Ve^{j\omega t}/Z(j\omega) \tag{1.10}$$

另外，如果 $v(t)$ 为 $V\sin\omega t$（$V\cos\omega t$），$i(t)$ 可以是上式中的虚部（实部）。

(ii) 当 $v(t)$ 的频率函数为 $(f(t),T)$ 时，设 $f(t)$ 的傅里叶级数展开为

$$\left.\begin{aligned} f(t) &= \sum_{-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \\ \omega_0 &\triangleq 2\pi/T,\quad T\ 为周期 \end{aligned}\right\} \tag{1.11}$$

当外加 $e^{jn\omega_0 t}$ 时的响应，可由在式(1.10)中，将 ω 置换成 $n\omega_0$ 得到

$$i_n=e^{jn\omega_0 t}/Z(jn\omega_0) \tag{1.12}$$

这样一来，式(1.11)中的 $f(t)$ 对应的响应 $g(t)$ 如下所示：

$$g(t)=\sum_{-\infty}^{\infty}\left[c_n e^{jn\omega_0 t}/Z(jn\omega_0)\right] \tag{1.13}$$

(iii) 当 $v(t)$ 为非周期函数时，设 $v(t)$，$i(t)$ 的傅里叶变换为 $V(j\omega)$，$I(j\omega)$，那么将式(1.4)进行傅里叶变换后，得到

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}\left(L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+Ri+\frac{1}{C}\int i\mathrm{d}t\right)e^{-j\omega t}\mathrm{d}t=V(j\omega)$$

所以

$$\left(j\omega L+R+\frac{1}{j\omega C}\right)I(j\omega)=V(j\omega) \tag{1.14}$$

$$I(j\omega)=V(j\omega)/Z(j\omega) \quad Z(j\omega)=j\omega L+R+1/j\omega C \tag{1.15}$$

$$i(t)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{\infty}[V(j\omega)/Z(j\omega)]e^{j\omega t}\mathrm{d}\omega \tag{1.16}$$

3. 导抗函数,正实函数

导抗函数 $W(s)$ 为如下所示的正实函数(positive real function)。

定义 1 有理正实函数(集中常数电路的导抗)

$W(s)$ 为有理函数,且其定义域和值域都位于 s 的右半平面,也就是说 $\mathrm{Re}s>0$,于是有:

(i) $W(\bar{s})=\overline{W(s)}$,(如果 $s>0$,那么有 $W>0$)。

(ii) 如果 $\mathrm{Re}s>0$,那么 $\mathrm{Re}W(s)>0$。

定义 2 正实函数(含有分布常数电路的情况)

(i) $W(\bar{s})=\overline{W(s)}$,(如果 $s>0$,那么有 $W>0$)。

(ii) 如果 $\mathrm{Re}s>0$,那么 $\mathrm{Re}W(s)>0$。

(iii) 因为 $\mathrm{Re}s>0$,所以 $W(s)$ 正则。

1.1.2 电 源

将具有提供电能能力的电路视为一种电路元件时,称之为**电源**。电源一般如图 1.5 所示来表示。

1. 理想电源

(1) 理想电压源(恒压源)。我们把满足下面两个条件的电源称为**理想电压源**也称为**恒压源**:

(i) 与负载无关,提供一定的电压输出。

(ii) 内部阻抗 $Z_0=0$。

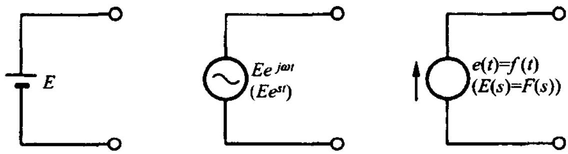
理想电压源,根据其波形为直流、交流或者一般的波形,分别如图 1.3(a)、(b)和(c)所示。

在以后的章节中,我们将会利用导抗的概念,所以代替电压 $v(t)$、电流 $i(t)$ 多采用它们的拉普拉斯变换的 $V(s)$,$I(s)$ 或者傅里叶变换的 $V(j\omega)$,$I(j\omega)$。

(2) 理想电流源(恒流源)。我们把满足下面两个条件的电源称为**理想电流源**或**恒流源**:

(i) 与负载无关,提供一定的电流输出。

(ii) 内部导纳 $Y_0=0$(内部阻抗 $Z_0=1/Y_0$ 为无穷大)。



(a) 直流　　(b) 正弦波交流　　(c) 一般的波形

图 1.3　理想电压源（恒压源）

理想电流源如图 1.4 所示。

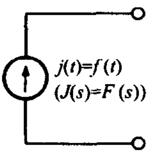


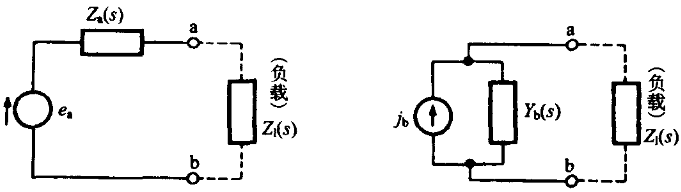
图 1.4　理想电流源（恒流源）

2. 一般的电源

一般情况下的电源都含有一定大小的内部导抗，电压源和电流源分别如图 1.5(a)和(b)所示。

在这里，我们来求一下两个电源等价的条件。如果两个电源等价，那么将任意两个相同的负载 Z_l 与两个电源相连接时，流过 Z_l 的电流应该一样。

定理 1.1　图 1.5 的电压源和电流源等价的充分



(a) 电压源　　(b) 电流源

图 1.5　电压源和电流源

必要条件是：

(i) $Z_a = Z_b = 1/Y_b$，$(Z_b \triangleq 1/Y_b)$　　(1.17)

(ii) $e_a = Z_b j_b = j_b / Y_b$　　(1.18a)

证明 严格的证明请参考文献[1]p.276～277[1)]。简单的证明如下：

当 a 端和 b 端断路时电压相等，所以

电压源：$V=e_{\mathrm{a}}$，电流源：$V=j_{\mathrm{b}}(Z_{\mathrm{b}})$

所以 $e_{\mathrm{a}}=j_{\mathrm{b}}Z_{\mathrm{b}}$ (1.18b)

同理，a 端和 b 端短路时的电路相等，所以

电压源：$I=e_{\mathrm{a}}/Z_{\mathrm{a}}$，电流源：$I=j_{\mathrm{b}}$

所以 $e_{\mathrm{a}}/Z_{\mathrm{a}}=j_{\mathrm{b}}$ (1.18c)

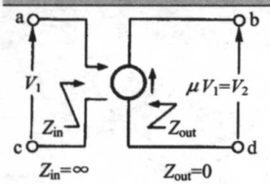
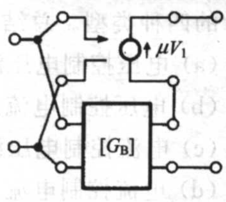
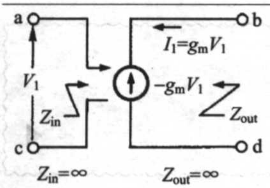
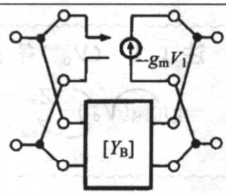
根据式(1.18b)和式(1.18c)可得

$$\left.\begin{aligned} Z_{\mathrm{a}} &= Z_{\mathrm{b}} \\ e_{\mathrm{a}} &= Z_{\mathrm{b}}j_{\mathrm{b}} \end{aligned}\right\} \qquad (1.17\mathrm{d})$$ ◀

3. 控制电源

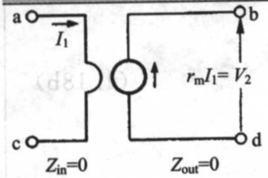
在由晶体管等有源元件构成的等效电路中，一般采用如表 1.1 所示的二端口网络等的理想电源电路。这种理想电源电路称为控制电源。

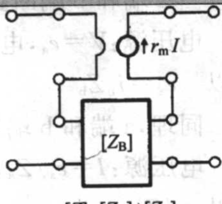
表 1.1 控制电源

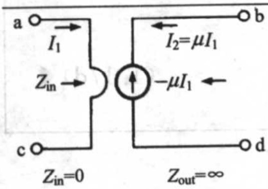
(A)控制电源	(B)矩阵表示	(C)可能的连接(分解)
 $Z_{\mathrm{in}}=\infty$ $Z_{\mathrm{out}}=0$ (a) 电压控制电压源(V_0^∞)	混合矩阵 $[G_{\mathrm{A}}]=\begin{bmatrix}0 & 0\\ \mu & 0\end{bmatrix}$ $[K]=\begin{bmatrix}1/\mu & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}$	 $[G]=[G_{\mathrm{A}}]+[G_{\mathrm{B}}]$
 $Z_{\mathrm{in}}=\infty$ $Z_{\mathrm{out}}=\infty$ (b) 电压控制电流源(V_∞^∞)	Y 矩阵 $[Y_{\mathrm{A}}]=\begin{bmatrix}0 & 0\\ g_{\mathrm{m}} & 0\end{bmatrix}$ $[K]=\begin{bmatrix}0 & -1/g_{\mathrm{m}}\\ 0 & 0\end{bmatrix}$	 $[Y]=[Y_{\mathrm{A}}]+[Y_{\mathrm{B}}]$

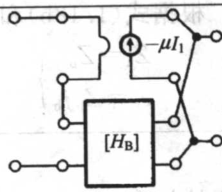
1) 文献[1]尾崎弘，金田弥吉，谷口庆治，横山正人：《电子电路——模拟篇》共立出版社(1989)。(该书是本系列之一。)

续表 1.1

<table>
<tr><th>(A)控制电源</th><th>(B)矩阵表示</th><th>(C)可能的连接(分解)</th></tr>
<tr><td>

(c) 电流控制电压源(J_0^0)</td><td>Z 矩阵
$[Z_A]=\begin{bmatrix}0 & 0\\ r_m & 0\end{bmatrix}$
$[K]=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 1/r_m & 0\end{bmatrix}$</td><td>

$[Z]=[Z_A]+[Z_B]$</td></tr>
<tr><td>

(d) 电流控制电流源(J_∞^0)</td><td>混合矩阵
$[H_A]=\begin{bmatrix}0 & 0\\ -\mu & 0\end{bmatrix}$
$[K]=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & -1/\mu\end{bmatrix}$</td><td>

$[H]=[H_A]+[H_B]$</td></tr>
</table>

由表中的图可知，这些电源是将输入端(a,b)处的电压 V_1 和电流 I_1，分别变成 $V_2=\mu V_1$ 或 $V_2=r_m I_1$；$I_2=-g_m V_1$ 或 $I_2=-\mu I_1$ 的电路。

这些电源，根据输入阻抗 Z_{in} 和输出阻抗 Z_{out} 是 0 还是∞，分如表 1.1 所示的四种类型。总结如下：

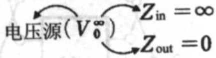
(a) 电压控制电压源：(V_0^∞)

(b) 电压控制电流源：(V_∞^∞)

(c) 电流控制电压源：(J_0^0)

(d) 电流控制电流源：(J_∞^0)

注 1.1 (V_0^∞)等表示的意思是：



表中的第 2 列，表示控制电源的二端口网络(关于二端口网络的表示请参见 1.3 节)。例如，(V_0^∞)表示混合矩阵[G]和[K]存在，并且