

电子技术教学小丛书

晶体管放大器的 信号流图分析法

邵钟武 编



高等教育出版社

电子技术教学小丛书

晶体管放大器的 信号流图分析法

邵钟武 编



高等教育出版社

内 容 简 介

本书是高等学校工科电工教材编审委员会电子技术编审小组组织评选的“电子技术教学小丛书”之一。主要介绍信号流图法在电子线路分析中的应用。第一章讲述信流图的基本概念、主要简化规则以及梅森公式；第二章讲述如何用信流图法分析晶体管的各种交流参数及关系；第三章讨论如何用信流图法分析某些晶体管电路；第四章讨论用信流图法分析各种反馈放大器。

本书叙述简明，文字通顺，可作为大学生扩大知识面的阅读材料，也可供有关教师和科技人员参考。

本书由华中工学院汤之璋教授审阅。

本书责任编辑 张志军

2545/18
电子技术教学小丛书

晶体管放大器的信号流图分析法

邵钟武 编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

上海新华印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/32 印张 5.875 字数 110,000

1982年8月第1版 1983年8月第1次印刷

印数 00,001—9,500

书号 15010·0420 定价 0.75 元

前 言

信号流图 (Signal flow graph) 法是一种解线性方程组的方法,它是在研究模拟计算机的过程中发展起来的。这种新颖的方法自从梅森 (S. J. Mason) 在五十年代中公开提出后引起了广泛的兴趣,现已在很多工程领域中得到应用。电子技术是信流图法应用得很广泛而又卓有成效的一大领域。与常规的分析计算晶体管电路的方法相比,采用信流图法不仅概念清楚,其计算工作量也要少很多,尤其是用它来分析计算反馈放大器就更显得优越。

但是,信流图法却至今尚未“入流”,也就是说它尚未在我国高等院校的电子技术课程中被正式采用。究其原因,恐怕是由于现在电子技术这门课的内容太广,因而无暇去介绍一种与传统方法很不相同的新方法吧!作者在1980年给华东石油学院电77班学生讲电子技术课时,把信流图法作为基本的计算方法,取得了较好的效果。过去对一些较复杂的电路,由于计算工作量太大,无法进行精确计算,只好作估算。在采用了信流图法以后,对各种线路的精确计算困难大减而便于进行。这对培养学生思维的严密性,正确认识各种近似估算方法的条件、可靠性与精度是有相当帮助的。看来,信流图法是值得作为一种基本的方法,在一些要求较高的电子技术课中采用的。至少可以把它介绍给学习电子技术课的基本内容后尚有余力的学生,以扩大他们的计算能力与思维方法。

本书的目的是把信流图作为一种简化电子线路分析计算

的方法,介绍给读者,以帮助读者更好地掌握电子技术课的基本内容。作者认为,学习一种方法,关键是要“熟”,“熟”才能生“巧”,才有实用价值。因而,本书在介绍信流图法的最基本原理与规则后,就直接把它用到计算晶体管电路的实践中去,以免“战线”拉的过长而不能迅速形成“生产力”。至于一些有用的技巧,则放在有关应用中逐步介绍。本书在每章的最后,附有一些习题,并在书末的附录中给出各题的答案,以帮助读者自学。本书将尽量选用现行电子技术教科书中常用的电路作为分析的例题,以便读者与常规的方法作对比,体会信流图法的特点与优点。

本书的第一章介绍信流图的基本概念,信流图的几个主要简化规则,以及应用很广的梅森公式。第二章阐述如何用信流图法来分析晶体管的各种交流参数间的关系。第三章讨论如何用信流图法精细地分析一些基本的晶体管电路。第四章用于讨论各种负反馈放大器的信流图分析法。作者希望,通过对以上这些基本内容的介绍,能有助于读者掌握用信流图法分析晶体管放大器,并有兴趣探索信流图法在其它线性电路或线性系统中的应用。

本书是根据作者在教学工作中的的一些初步体会加工整理而成的。由于作者水平所限,定会有不少错误与不足之处,恳请读者批评指正。

本书所附各章的习题答案是邵京一同志演算作出的。

华中工学院工业电子学教研室汤之璋教授,在审阅本书的书稿时,提了不少宝贵的具体意见,特此表示衷心地感谢。

作者 1981.11

目 录

前言	1
第一章 信流图的基本原理	1
1-1 信流图与网络方程组	1
1-2 信流图的一些基本简化规则	7
1-3 梅森公式	15
1-4 应用举例	23
习题	26
第二章 晶体管的交流参数	29
2-1 晶体管的 H 参数和 Y 参数	29
2-2 晶体管的 T 型等效电路	37
2-3 复合管的参数	41
2-4 场效应管的参数	49
习题	51
第三章 基本晶体管放大器	53
3-1 晶体管放大器的静态工作点及其稳定性	53
3-2 用四端流图分析基本放大器	58
3-3 射极输出器	71
3-4 双管直接耦合放大器	81
3-5 场效应管放大器	87
3-6 晶体管恒流源	91
习题	95
第四章 反馈放大器	97
4-1 反馈放大器的基本概念	97
4-2 单级电流串联负反馈放大器	100
4-3 单级电压并联负反馈放大器	110

4-4 电流并联负反馈放大器	116
4-5 电压串联负反馈放大器	127
4-6 多级反馈电路分析举例	136
4-7 差动放大器	148
4-8 运算放大器线性应用电路	160
4-9 串联型稳压电源	164
习题	169
参考文献	174
习题答案	175

第一章 信流图的基本原理

本章介绍信流图的基本概念与性质,共分四节:

第一节介绍电网络的信流图与网络方程组的关系;

第二节讲化简信流图的几个主要规则;第三节介绍

在信流图法中十分重要的梅森公式;第四节举一些

应用信流图法解无源网络的例题。

1-1 信流图与网络方程组

我们知道,电路分析的一般问题可以概括为根据输入(或激励)求输出(或响应)。为了求出一个网络的传递函数或“传输”,需要根据网络的结构与元件的参数,应用电路的基本定律,列出制约各网络变量相互关系的一组网络方程,然后去求解。例如,对于图 1-1 所示的梯形网络,若把 V_1 作为输入, V_4

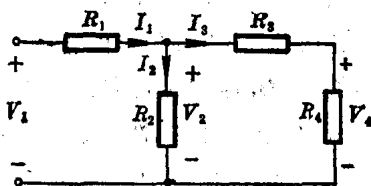


图 1-1 梯形网络

作为输出,则这个网络的传输 $T = V_4/V_1$ 。下面根据图 1-1 的电路结构,利用欧姆定律及克希荷夫电压定律(KVL)和电流定律(KCL),列出一组方程:

$$V_4 = R_4 I_3 \quad (1-1a)$$

$$I_3 = \frac{V_2}{R_3 + R_4} \quad (1-1b)$$

$$V_2 = R_2 I_2 \quad (1-1c)$$

$$I_2 = I_1 - I_3 \quad (1-1d)$$

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{R_1} = \frac{1}{R_1} V_1 - \frac{1}{R_1} V_2 \quad (1-1e)$$

解这个方程组, 就可以求得 V_1 到 V_4 的传输。

现在注意这个方程组在写法上的特点, 也就是方程组每个方程的左边只有一个网络变量, 而方程的右边可以是几个网络变量的线性组合。这里, 我们把每一个方程都理解为对一种因果关系的说明: 方程左边的网络变量是“果”, 方程右边的网络变量是产生这个“果”的“因”或“源”。比如, 式(1-1a)中, V_4 是“果”, I_3 是产生 V_4 的“因”, 而电路参数 R_4 是从 I_3 这个“因”到 V_4 这个“果”的传输。因为我们现在给定的输入是 V_1 而不是 I_3 , 所以 I_3 虽然是产生 V_4 的直接原因, 却并非真正的“源”, 故称为“伪源”。方程(1-1b)中, V_2 是产生 I_3 的原因, 而 $1/(R_3 + R_4)$ 是从 V_2 到 I_3 的传输。不过 V_2 也不是给定的输入, 它还是“伪源”。方程(1-1c)中, I_2 是产生 V_2 的原因, I_2 到 V_2 的传输是 R_2 , I_2 也是伪源。方程(1-1d)中, 我们把 I_2 看成“果”, 把 I_1 和 I_3 的线性组合看成是产生 I_2 的原因, 而从 I_1 和 I_3 到 I_2 的传输分别是 1 和 -1。最后, 在方程(1-1e)中, I_1 是“果”, V_1 和 V_2 是“源”, 而且 V_1 是这组方程的唯一由外部给定的独立变量, 是真正的源。

上述各方程所表示的各网络变量间的因果关系, 可以用图 1-2 所示的拓扑图清楚地表示出来。这种表示线性方程组

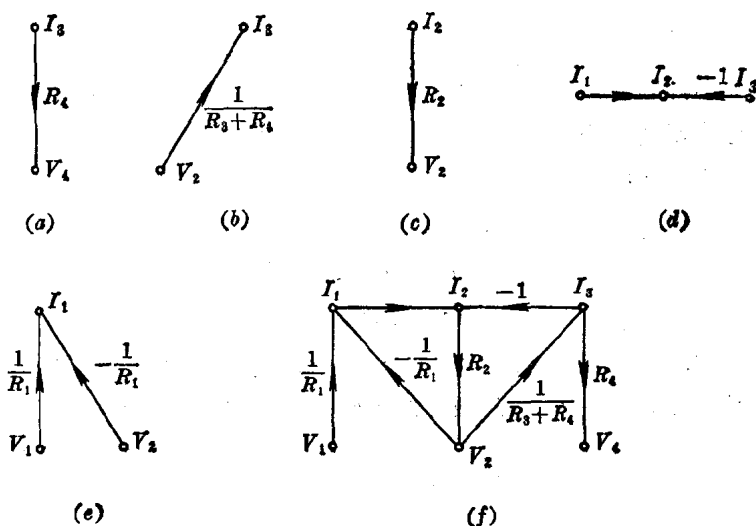


图 1-2 图 1-1 网络的信流图

的拓扑图就称之为信号流图 (signal flow graph), 在本书中简称为信流图。

现在来说明信流图是怎样代表方程式的。图 1-2(a) 表示的是式 (1-1a), “节点” V_4 和 I_3 表示相应的网络变量, 从 I_3 指向 V_4 的有向“支路” R_4 表示其传输, 支路箭头的方向是从“因”指向“果”。同理, 图 1-2(b) 与图 1-2(c) 分别表示式 (1-1b) 和式 (1-1c)。图 1-2(d) 是代表式 (1-1d) 的, 这里网络变量 I_2 由两个原因 I_1 和 I_3 的线性组合产生, 从 I_1 到 I_2 的支路传输是 1, 从 I_3 到 I_2 的支路传输是 -1 。当支路的传输为 1 时, 一般就不在其支路旁标注了, 所以图 1-2(d) 中从 I_1 到 I_2 的支路旁没有标传输值。图 1-2(e) 代表方程式 (1-1e), 这里 I_1 由 V_1 和 V_2 产生, 相应的传输值分别是 $1/R_1$ 和 $-1/R_1$ 。

把代表方程式(1-1a)到(1-1e)的五个图合并, 就得到了表示整个网络各变量关系的信流图, 如图 1-2(f) 所示。图 1-2(f) 就是网络方程组(1-1)的信流图。当然, 信流图也可用于表示其它线性系统的方程。现在来说明怎样用信流图表示一个一般的线性方程组。

设有一个二元线性方程组

$$\begin{cases} a_1x + a_2y = a_3 \\ b_1x + b_2y = b_3 \end{cases} \quad (1-2)$$

其中, x 与 y 是待求量; a_1, a_2, a_3 和 b_1, b_2, b_3 等为常数。在用信流图表示上述方程组时, 应把它先改写成以下的形式,

$$\begin{cases} x = -\frac{a_2}{a_1}y + \frac{a_3}{a_1}c \end{cases} \quad (1-3a)$$

$$\begin{cases} y = -\frac{b_1}{b_2}x + \frac{b_3}{b_2}c \end{cases} \quad (1-3b)$$

式(1-3a)中的 c 现等于 1, 代表给定的输入量。在式(1-3a)中, 我们把 x 看成是由 y 与 c 两个“原因”线性组合产生的“结果”, 它可用图 1-3(a) 的信流图表示。式(1-3b)中的 y , 现看成是由 x 与 c 两个“原因”线性组合产生的“结果”, 它的相应的信流图如图 1-3(b) 所示。把图 1-3(a) 与图 1-3(b) 合并, 所得的图 1-3(c) 就是表示方程组(1-2)的信流图。

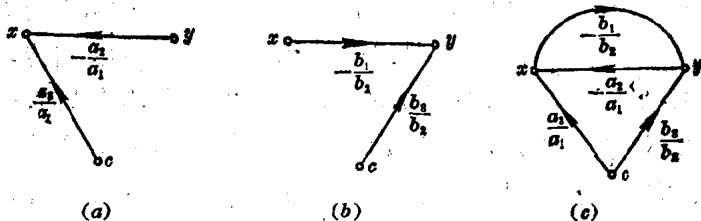


图 1-3 式(1-2)的信流图

关于信流图还有三点要说明。第一，我们说信流图是一种拓扑图，就是说这种图的含意与它的几何形状无关，而只取决于它所包含的节点与支路的数目、支路的传输值以及节点与支路相互关联的情况。把一条支路画成直的还是弯的，长一点还是短一点，只要该支路的传输值和方向不变，它所关联的节点不变，就对信流图无影响。当然，我们总还是希望把它画得清楚一些，尽量避免支路相互的交叉。第二，我们知道一个线性方程组，可以变换成许多与它等效的形式。比如，可在式(1-2)的第一式等号的两边都加 x ，第二式等号两边都加 y ，把常数项移到等式左边再对调等式两边的量，式(1-2)就可变换成以下形式

$$\begin{cases} x = (1+a_1)x + a_2y - a_3c \\ y = b_1x + (1+b_2)y - b_3c \end{cases} \quad (1-4)$$

其中 $c=1$ 。

从式(1-4)作出的信流图如图 1-4 所示。在此图中，有一

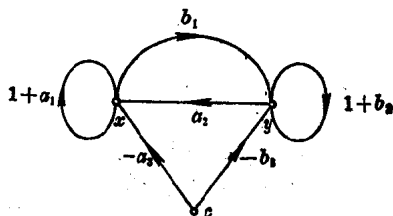


图 1-4 式(1-2)的另一种信流图

个从节点 x 到 x 的支路 $(1+a_1)$ ，还有一个起止都在节点 y 上的支路 $(1+b_2)$ ，这种支路称为“自环”(self-loop)。因为式(1-4)与式(1-2)是互相等效的，所以图 1-4 与图 1-3(c) 也互相等效。

第三, 信流图所表示的是网络变量间的关系, 我们应把它与表示网络结构的拓扑图相区别。不过这两种图所用的名词术语有许多是一致的。现在把信流图中常用的一些名词的定义作一简要的说明。

节点——在信流图中, 每一节点代表方程组中的一个变量, 在图中用符号“ $\circ$ ”表示。

支路——连接任意两节点的线段称为支路, 支路是有方向的, 也是有“权”的, 支路的方向代表信号传递的“流向”, 而支路的权就是它的传输值。

对于一个节点来讲, 指向它的支路称为入支路, 背向它的支路称为出支路。一个节点所代表的变量的值, 只与各入支路的传输及所关联的其它节点所代表的变量有关, 而与出支路无关。这里不存在流入等于流出这样的定理, 从一个节点 x “流出”的信号强度就是 x , 而与该节点有几条出支路无关。如果一个节点所关联的支路都是出支路, 如图 1-5 中的节点 x_1 ,

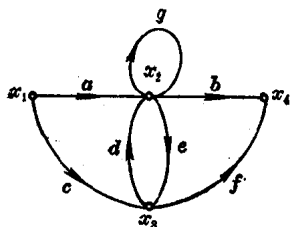


图 1-5 用来说明信流图结构名词的图

则这样的节点称为“源节点”。源节点在网络中代表输入变量, 我们应注意把这种节点与其它节点相区别。另外, 只与入支路相关联的节点称为“汇节点”, 如图 1-5 中的 x_4 。

路径——从一个节点到另一个节点的一些依次连接的支

路的集合,它们与路径中各节点只相遇一次。比如,图 1-5 中从节点 x_1 到 x_4 的路径有四条: $a \rightarrow b$; $a \rightarrow e \rightarrow f$; $c \rightarrow f$; $c \rightarrow d \rightarrow b$ 。注意, $a \rightarrow g \rightarrow b$ 不能算,因为与 x_2 相遇两次。

回路——从一个节点出发又返回到同一节点的路径称为回路。比如,图 1-4 中的 $a_2 \rightarrow b_1$ 、 $(1+b_2)$ 和 $(1+a_1)$, 图 1-5 中的 g 及 $d \rightarrow e$ 。其中图 1-4 中的 $(1+b_2)$ 、 $(1+a_1)$ 及图 1-5 中的 g 为自环或自回路。信流图中的回路可以理解为一种反馈,回路数越多信流图就越复杂。

[例 1-1] 写出图 1-6 所示的信流图所代表的方程组。

解: 这个信流图共有四个节点, 其中节点 A 是源节点, 其它都不是。对于图中每一个非源节点, 根据它所关联的入支路, 可以写出一个相应的方程式。比如, 对节点 x , 它关联两条传输分别为 -1 和 2 的入支路, 相应的方程是

$$x = 2y - A$$

对于节点 y 和 z , 也可根据它们各自关联的入支路 (自环也是入支路) 的情况, 分别写出以下方程:

$$y = 2x - z;$$

$$z = -3x + y - z + A$$

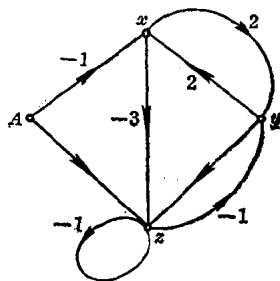


图 1-6 例 1-1 的信流图

经整理后, 信流图所代表的方程组是

$$\begin{cases} x - 2y = -A \\ 2x - y - z = 0 \\ 3x - y + 2z = A \end{cases}$$

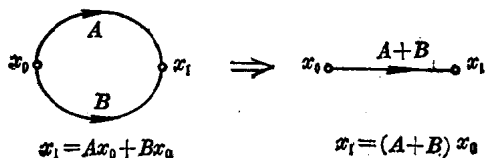
1-2 信流图的一些基本简化规则

前面讲了怎样用信流图来表示网络方程组, 接下去的问

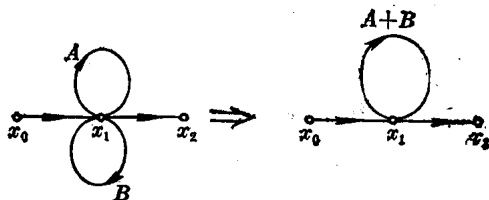
题就是根据给定的输入，怎样从信流图上求得所需的输出或传输(即输出与输入的比)。从信流图上直接求出所需传输的最有用的工具是梅森公式，我们在下一节再讨论它。本节先来说明信流图的一些基本的简化规则。利用这些规则，我们可以化简一个复杂的信流图，从而便于梅森公式的应用，或者逐步化简到能直接看出所需的解答。

(一) 并联支路的合并

连接在两节点间方向相同的支路称为并联支路。如图 1-7(a) 中的支路 A 和 B 就是两条并联的支路。两条并联的支路可以合并成一条支路，其传输值为原来两条并联支路的传输值之和 [参看图 1-7(a)]。这条规则称为并联支路的加



(a)



(b)

图 1-7 支路的并联

法规则，它显然可以推广到更多条并联支路的化简上去。在图 1-7(b) 左边一个图的节点 x_1 有两个自环 A 与 B ，它们也相当于两条并联的支路，可以合并成一个环，其传输是

$(A+B)$ 。

(二) 串联支路的化简

两条支路串联(参看图 1-8), 若对中间节点 x_1 所代表的变量不感兴趣, 则可以简化为一条从 x_0 到 x_2 的支路, 其传输值为两串联支路传输值的乘积。这个规则称为串联支路的乘法规则。

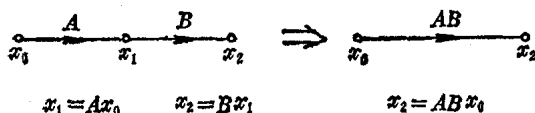


图 1-8 支路的串联

(三) 节点吸收的规则

我们知道, 信流图中的每一个节点, 表示的是方程组中的一个变量。在解方程时, 每消去一个元或变量就相当于在信流图中“吸收”掉一个节点。上面串联支路的化简, 就是一个消元或节点吸收的运算, 不过它只能用在不分岔的情况。

对于图 1-9(a) 左边的信流图, 它所代表的方程是: $x_2 =$

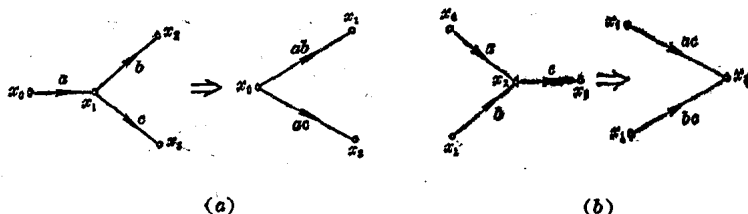


图 1-9 节点的吸收

bx_1 ; $x_3 = cx_1$; $x_1 = ax_0$ 。从这三个方程中消去 x_1 可得: $x_2 = abx_0$; $x_3 = acx_0$, 这就是右边的信流图所代表的方程。所以, 图 1-9(a) 的两个图是等效的。同样可以证明, 图 1-9(b) 的两个

图也是等效的。由此我们可以归纳出节点吸收的规则如下：
从被吸收节点的每一条入支路起端的节点，各连一条支路到被吸收节点的每一条出支路末端的节点，其传输值是原图中连接相应节点的路径的两支路传输值的乘积。

【例 1-2】 试从图 1-10(a) 所示的信流图中吸收掉节点 x_1 。

解：节点 x_1 有两条入支路关联到节点 x_0 与 x_3 ，有两条出支路关联到节点 x_2 和 x_4 。根据节点吸收的规则，我们应从 x_0 与 x_3 分别引支路直接到 x_2 与 x_4 ，其相应的传输值为 ab 、 ad 、 cb 及 cd [参看图 1-10 (b)]。

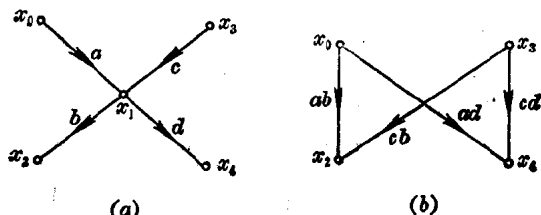


图 1-10 例 1-2 的信流图

【例 1-3】 利用上述简化规则求图 1-11(a) 所示信流图的传输 $T_{10} = x_4/x_{00}$ 。

解：从图 1-11(a) 中吸收节点 x_1 后可得图 1-11(b)。

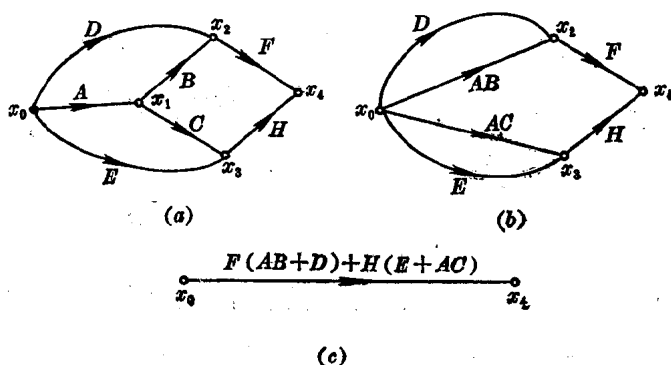


图 1-11 例 1-3 的信流图