

高等院校 **电子线路** 辅导教材

电子线路 解题指南

王 楚 余道衡 编著

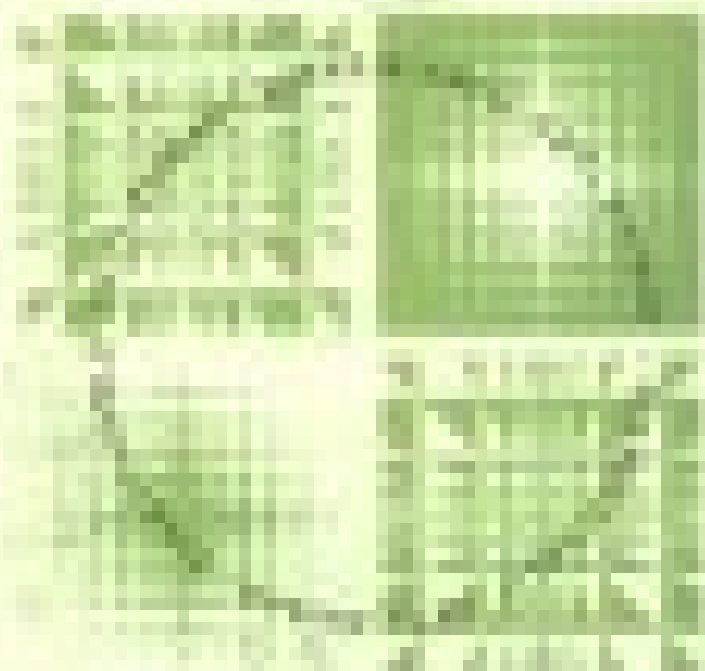


北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

教育部“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
教育部“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电子线路 解题指南

夏 颖 王 颖 郭 颖 编



清华大学出版社
Tsinghua University Press

电子线路解题指南

王 楚 余道衡 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

电子线路解题指南/王楚,余道衡编著. —北京:北京大学出版社,2005.5
ISBN 7-301-08095-6

I. 电… II. ①王… ②余… III. 电子电路-高等学校-解题 IV. TN710-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 108394 号

书 名: 电子线路解题指南

著作责任者: 王 楚 余道衡 编著

责任编辑: 孙 琰

标准书号: ISBN 7-301-08095-6/TN · 0021

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

排 版 者: 北京高新特打字服务社 51736661

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

730×980 16 开本 16 印张 304 千字

2005 年 5 月第 1 版 2005 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 0001—3000 册

定 价: 24.00 元

序

本书是《电子线路》^①一书的辅助参考书,对《电子线路》共九章的 339 道思考题和习题进行了精要的解答和说明,编排顺序与《电子线路》完全相同。

《电子线路》是以《电路分析》^②一书为基础写成的。《电路分析》包含线性电路的解法与信号分析基础、线性网络基础以及基本非线性电路三部分。《电子线路》以反馈理论为主线,侧重集成模块的组成与应用,包含反馈理论与放大器(第二章至第四章)、强正反馈(自激环路)电路(第五章至第七章)和反馈控制电路(第八章与第九章)三个主题。《电子线路》的内容编排和一些论述与某些教材不同,希望引起读者思考。思考题和习题是该书的重要组成部分,其中大部分是作者编的,也有一些是引用其他文献的。这些题大致体现出对学生的引导,但不是针对某种考试要求的练习。显然,在校生不可能全做,也不要求全做。在作者执教时,总是鼓励学生阅读其他参考书,选做适合自己磨炼和钻研的题。

《电子线路》中的思考题大致有以下三类:

- (1) 复习基本概念. 要求学生能严格地按准确的概念分析问题。
- (2) 引导深入理解. 促使学生进一步发掘书中所论述的命题的内涵,养成深入、有序地分析问题的习惯。
- (3) 提出一些应予以关注的实际知识,但不一定能用相应的章节求解. 这类题目的目的只是提示学生注意可能观察到的实际现象(最好记录在案),适时地联系课程思考,但不要急于得到完整的解答. 作者认为,这是一种应有的学风。

《电子线路》中的习题大致与相应章节的主题对应,其中有些具有实际意义的背景,有些要求读者综合运用诸方面的知识解题。显然,某些题对在校大学生是难了一些,不一定立即会做。作者的目的仅在于提示学生还有继续钻研的必要。大学的主要课程并不是学一遍就能穷其尽的,现在的一些大学生常对这个问题缺乏应有的思想准备。

作者并不提倡在校生盲目地多做题,但鼓励学生做好若干题。所谓做好题是指,不论经过什么摸索过程,必须把思路与解法整理得有条理、简捷、明快,并认

① 王楚,余道衡. 电子线路. 北京:北京大学出版社,2003.

② 王楚,余道衡. 电路分析. 北京:北京大学出版社,2000.

真书写. 解答应包含以下三项:

(1) 扼要地说明立论与分析的依据.

(2) 简捷明快的演算.

(3) 对某些题,还可以对结论作分析和讨论,也可以简要地说明自己的感受.当然,这一项常是仁者见仁,智者见智,没有标准答案.

总之,做题的要点是练习“思路”,力戒急躁盲动.

此外,本书在第三章至第九章中增加了 20 道补充题,并给出相应的参考解答.这些题是参照近十年来历届全国大学生电子设计竞赛题编写的,具有综合性和一定的难度.研读并解答这些题,对培养学生综合和灵活运用所学知识的能力有所帮助.感谢沈伯弘教授为我们提供了相关资料.

作者欢迎广大教师、学生和其他读者提出自己的见解,并指出书中的缺点和错误,以期进一步改进.

编 者

2005 年春

目 录

第一章 绪论	(1)
摘要	(1)
思考题	(2)
习题	(5)
第二章 反馈	(10)
摘要	(10)
思考题	(11)
习题	(29)
第三章 运算放大器	(48)
摘要	(48)
思考题	(49)
习题	(64)
补充题	(84)
第四章 功率放大器与调谐放大器	(97)
摘要	(97)
思考题	(98)
习题	(109)
补充题	(121)
第五章 脉冲电路基础	(126)
摘要	(126)
思考题	(127)
习题	(137)
补充题	(150)
第六章 振荡器	(155)
摘要	(155)
思考题	(157)
习题	(166)
补充题	(178)

第七章 寄存器与计数器	(189)
摘要.....	(189)
思考题.....	(189)
习题.....	(194)
补充题.....	(200)
第八章 直流电源	(203)
摘要.....	(203)
思考题.....	(204)
习题.....	(209)
补充题.....	(215)
第九章 自动频率控制	(225)
摘要.....	(225)
思考题.....	(226)
习题.....	(232)
补充题.....	(240)

第一章 绪 论

摘 要

《电子线路》第一章是给学生的阅读资料. 作者希望学生在学习《电子线路》一书以前, 先回顾一下在《电磁学》^①和《电路分析》两书中的某些基本概念, 粗略地知道关于集成电路(integrated circuit)的常识. 第一章只是预习资料, 并不要求学生深刻理解.

§ 1.1 扼要地回顾了《电路分析》一书中关于放大器(amplifier)的基本概念. 这一节的一个特点就是介绍用对数坐标表述频率响应曲线的方法——波特(Bode)图. 这是技术科学中的常用方法, 也是本书将要采用的方法.

电子线路的一个主题是稳定性与抗扰性. § 1.2 提出了这个值得关注的课题. 在《电磁学》一书中, 曾提出一个基本概念——电路是电磁波(电磁场)的有线传输, 它以边界(元器件和传输线)上的电压和电流表征在空间输运的电磁波(电磁场). 防止每一部分电路的场的发散与辐射以及防止外部的场干扰电路, 是印刷电路板设计与组装工艺的主题, 也是现代电子线路设计的一个主题, 叫做“电磁兼容”(electromagnetic compatibility, 简称 EMC). 现代的家用电器和各种电子设备均已使用抗干扰的印刷电路板. “电磁兼容”是一个专门课题, 宜在实验和有关课程中介绍.

现代的电路设计已发展到专用集成电路设计和系统集成. 集成电路分单片集成电路与混合集成电路两类. 在 1.3.1 小节中介绍了关于双结型单片集成电路的常识, 说明单片集成电路比本书介绍的原理性电路要复杂得多. 要从事单片集成电路设计, 还要学习专门的课程. 此外, 也请读者注意, 在现在的某些商品中, 这一小节介绍的问题并没有完善地解决, 其性能可能与说明书不完全一致. 这也是实际工作中必须注意的问题.

混合集成电路实际上是微组装工艺, 也有助于抗干扰, 现在已普遍用于电子、电器装置中. 大学生和硕士生应具有设计混合集成电路的能力.

① 王楚, 李椿, 周乐柱. 电磁学. 北京: 北京大学出版社, 2000.

在混合集成电路设计与系统设计的过程中,已广泛采用计算机辅助分析方法,因此在 § 1.4 中作了简要的说明. 由于目前国内广泛推荐 PSPICE 程序,所以在 1.4.2 小节中对此作了简单介绍. 应该指出,可供使用的仿真分析软件是指 PSPICE 工业版(又叫专业版),目前某些学校使用的是教学版(又叫自由版). 教学版只用于训练学生熟练地使用有关的语言程序,很难对指定的电路给出有意义的仿真结果. 此外,仿真分析软件也不只是 PSPICE. 作者认为,有条件的学校应引导学生做一些有意义的仿真分析课题,并用真实的实验对照.

§ 1.5 补充了一些关于噪声的知识,只要求读者有一个印象,不必深究.

思 考 题

1.1 常参量线性互易网络是否可以有含双受控源的等效电路?两个受控源各有何意义?试以 Π 形网络为例说明之.

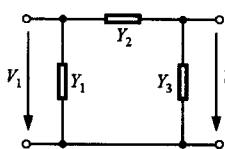


图 1.1

解答 常参量 Π 形网络(图 1.1)的 Y 参量方程为

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 + Y_2 & -Y_2 \\ Y_2 & -(Y_2 + Y_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} Y_1 + Y_2 & 0 \\ 0 & -(Y_2 + Y_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -Y_2 V_2 \\ Y_2 V_1 \end{bmatrix}.$$

其双受控源等效电路如图 1.2 所示,其中双受控源体现了互导纳表征的两个端口间的相互作用. $1-1'$ 端口的 $-Y_2 V_2$ 表示 $2-2'$ 端口电压对 $1-1'$ 端口的影响, $2-2'$ 端口的 $Y_2 V_1$ 表示 $1-1'$ 端口的电压对 $2-2'$ 端口的影响. 对于互易网络,两个方向的相互作用是对等的.

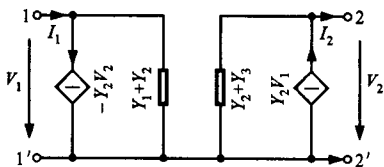


图 1.2

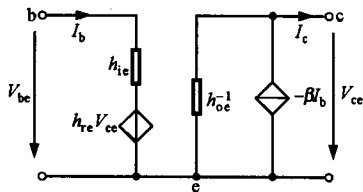


图 1.3

1.2 按 H 参量画出三极管的含双受控源的等效电路. 对于信号传输来说,两个受控源的意义有何不同?

解答 共 e 极晶体管的 H 参量等效电路如图 1.3 所示,其中电流控制电流源 $(-\beta I_b)$ 表示输入电流在输出端产生的效果,电压控制电压源 $(h_{re} V_{ce})$ 表示输

出电压对输入端的反作用. 该电路是非互易网络, 两个受控源的作用不是对等的. 在一定条件下, $h_{re}V_{ce}$ 的作用小到可不计, 则该电路可视为单向传输信号的网络.

1.3 试以收音机、电视机、示波器等装置为例, 说明增益及其频率响应的实际意义.

说明 本题只是提示读者, 在调节、使用电子装置时应注意观察, 并提出一些值得思考的问题作为学习的背景资料, 但不要急于得到解答. 作者以为, 注意观察和思考但又不急于求成, 是大学生应养成的思维习惯与心理素质. 下面只给出粗略的解答, 仅供参考.

解答 一般地说, 增益(gain)表征该设备可接收的弱信号, 频率响应(带宽)说明何种信号通过设备无显著的线性失真. 但增益高, 带宽大, 噪声也随之增大.

收音机、电视机等设备接收的信号有确定的频谱带宽, 其通频带应与信号的频谱带宽适配, 以抑制噪声, 但接收到的信号没有确定的振幅. 在接收到强信号时, 可能因振幅过大而有非线性失真. 此外, 信号大小还可能因自然条件的变化而涨落, 因而对前级放大器须实施自动增益调整, 以保持输出信号相对稳定.

示波器要显示信号的波形, 应有足够的带宽, 以适应不同的信号. 放大器的噪声应限定于不使扫描线模糊, 故宽带示波器的增益通常较低.

1.4 怎样理解失真度的定义? 它适用于描述线性失真, 还是非线性失真?

解答 失真度是描述准线性放大器非线性失真(distortion)的参量. 它是在输入信号为理想简谐信号的条件下, 输出信号中谐波(总和)有效值与基波有效值之比. 失真度与输入、输出信号的大小有关, 也与信号的频率有关.

1.5 在放大器有电抗性负载时, 为什么放大器的非线性失真与工作频率有关? 放大器的线性失真也与频率响应有关, 二者是同性质的问题吗?

解答 放大器的非线性失真决定于管子的电压和电流的变化范围. 在有感性负载时, 若输出的交流电流大小一定, 则输出的电压信号必随频率升高(或降低)而增大(或减小); 在有容性负载时, 若输出的交流电压大小一定, 则输出的电流信号必随频率升高(或降低)而增大(或减小). 容性负载是必然存在的, 至少有分布电容和结电容. 因此一般地说, 非线性失真与频率有关.

线性失真是指, 非简谐信号通过线性电路时, 其频谱各组分有不同的衰减与时延, 呈现为输出信号的波形与输入信号的波形不同. 线性失真只决定于电路的频率响应, 与信号的大小无关, 也不产生新的频谱, 与非线性失真的机制不同.

1.6 图 1.4 是用双电源供电的差分放大器, 两管集电极静态电流皆为 0.5 mA.

(1) 说明图中四个电阻的作用.

(2) 两管基极的偏置电流是通过什么电路供给的?

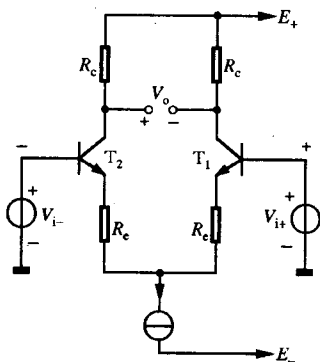


图 1.4

(3) 要组成有高输入阻抗和低输出阻抗的放大器, 应怎样改进电路?

解答 (1) 在图 1.4 中, 两个 R_c 是均流电阻, 它们补偿 T_1 和 T_2 的差异, 使两管有几乎相等的静态电流. 两个 R_c 是集电极供电电路, 也是集电极的负载.

(2) 两管的基极偏流由“地”通过信号注入基极, 流经发射极至负电源. 信号源应是直流(direct current, 简称 DC)通路. 偏流实际上是由负电源提供的.

(3) 为了提高输入阻抗, 可改用达林顿(Darlington)管, 或再加 FET^①源极跟随器作为输入级. 若要有低输出阻抗, 可加一级 PNP 管差分放大器(differential amplifier)作为中间级, 把双端输出变为单端输出, 并加一级互补跟随器作为输出级.

1.7 对于思考题 1.6 中的差分放大器, 应怎样选择参数(包括静态电流等)以利于抑制零飘? 采用何种工艺有助于抑制零飘? 是否有可能消除零飘?

解答 产生零飘的原因主要是:

(i) 温飘. 由于温度变化使两管的参数和元件的参数变化, 导致零点飘移(简称零飘). 尤其是两管和相应元件不对称的电路, 即使两管温度保持相等, 但因温度系数不同, 两管静态工作点的飘移量不同, 仍呈现为零飘.

(ii) 噪声中的低频与直流组分. 噪声中的低频与直流组分呈现为管子静态工作点较慢地涨落与飘移. 尤其是由表面结构变化引起的 $1/f$ 噪声, 其直流分量常使静态工作点在较长的时间内作单向飘移.

抑制零飘的方法主要包括:

(i) 严格控制元器件制造工艺, 制造参数几乎相同的管子, 并集成在同一芯片上, 保持两管的温度接近于相等. 若再把放大器封装在同一小温区内(混合集成电路), 也可削弱环境温度变化(例如机箱内的气流等因素)的影响.

(ii) 选用低噪声(主要是 $1/f$ 噪声)元器件. 由于两管和相应的元件不可能有完全相同的温度和温度系数, 温飘不可能完全消除. 尤其是噪声引起的两管静态工作点的变化不可能是同方向的、对称的, 因而也不可能消除. 但就静态参数设计而言, 若能在满足技术指标的条件下适当地降低管耗和电流, 总有助于降低

^① FET 是 field effect transistor(场效应晶体管)的简称.

管芯与元件的温度,必将在不同程度上减弱温飘,也有助于减弱元器件中界面上原子的热运动,并降低 $1/f$ 噪声。

1.8 为什么规范的印刷电路板的设计对于提高电子线路的抗扰性有重要的意义?

说明 本题要求学生观察几种现代商品中体现“电磁兼容”的印刷电路板,并与过去常用的电路板比较,用电磁学的基本概念给予说明。

1.9 单片集成电路中的晶体管与分立的晶体管有何不同?单片集成电路与分立元件电路有何不同?

说明 参照《电子线路》§ 1.2 和 1.3.1, 1.3.2 小节及以上各题,说出你自己的认识. 本题没有标准答案。

1.10 混合集成电路与分立元件电路有何相似之处? 有何不同? 在什么情况下宜用混合集成电路?

说明 混合集成电路是正在发展中的生产技术. 它可以是分立元件电路,也可以包含若干单片集成的不同芯片及若干精密元件. 本题旨在引起读者对《电子线路》1.3.2 小节的关注. 除 1.3.2 小节的介绍外,读者还应从抗扰性及保证必要的散热性能来认识混合集成电路设计. 本题没有标准答案。

1.11 系统设计过程一般应包括哪些主要环节? 每个环节的作用是什么? 各环节应如何配合才能完成好的系统设计?

说明 在初学时,读者可参照《电子线路》1.4.3 小节解答,但应对其中不可缺少的子过程作必要的论述. 在有工作经历之后,宜联系自己的工作经验与工程规范再思考。

1.12 计算机辅助分析软件在分析和设计电路时起什么作用? 你认为其中最重要的软件是什么? 在分析和设计电路时怎样正确使用它们?

说明 本题只是向读者提出值得思考的问题. 作者以为,在选用一种软件时,首先应了解库中的器件模型是否“仿真”,算法是否足够精确,能否按规范的电路板提炼分布参量,能否满足使用的要求. 切忌盲从于某种商业化宣传,把“黑匣子”当做放之四海皆准的真理,这是有害无益的. 本题只供读者思考,没有标准答案。

习 题

1.1 图 1.5 是单管放大器的原理图。

(1) 定性地说明各元件的作用;

(2) 说明该电路含有几节高通滤波器、几节低通滤波器;

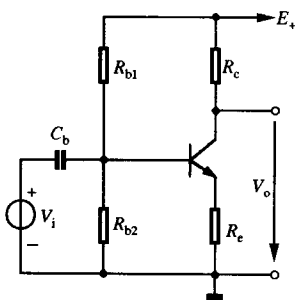


图 1.5

(3) 定性地画出它的幅频和相频特性曲线,并说明最大相移是多少。

解答 (1) C_b 是隔直耦合电容,它防止三极管基极与信号源之间形成直流通路,并使交流信号传输至基极。

R_{b1} 和 R_{b2} 是偏置电阻,它们和 R_e 决定了三极管的静态电流。 R_e 有稳定偏流、控制增益和抑制非线性失真的作用。

R_c 是集电极直流通路的负载,它决定了集电极静态电压,也是决定电压增益的因素之一。

(2) C_b 与三极管的输入电阻(含 R_{b1} 和 R_{b2})组成一节高通(high pass,简称 HP)滤波器。 R_c 与输出端口的分布电容组成一节低通滤波器(low pass,简称 LP)。 r_b 与 C_μ 和 C_x 等极间电容也可视为一节低通滤波器。实际上,前级(信号源)的输出电阻与输入端口的分布电容也组成一节低通滤波器。可以说,该电路至少含有两节低通滤波器。

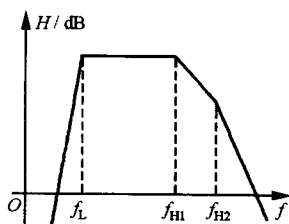


图 1.6

(3) 设高通滤波器的下界频(低半功率点)为 f_L ,两节低通滤波器的上界频(高半功率点)分别为 f_{H1} 和 f_{H2} ($f_{H2} > f_{H1}$),则幅频曲线的波特图大致如图 1.6 所示。这里说的低通滤波器是指上界频最低的两节低通滤波器。

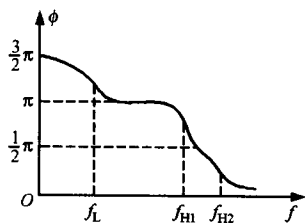


图 1.7

该放大器因属反相放大,故有相移 π (或 $-\pi$)。此外,还有各滤波器的附加相移。在低频,高通滤波器的相移可自 $\pi/2$ 至 0;在高频,两节低通滤波器的相移可自 0 至 $-\pi$ 。故相频曲线大致如图 1.7 所示。

1.2 图 1.8 是 JFET^① 与三极管组成的两级电压跟随器。已知 JFET 的跨导为 1mA/V ,三极管的电流增益等于 50,信号源的输出电阻为 $200\text{k}\Omega$ 。试估计该电路的输出电阻。

解答 JFET 跟随器的输出电阻与前级(信号源)的输出电阻无关,有

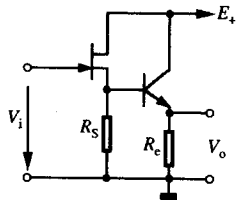


图 1.8

① JFET 是 junction field effect transistor(结型场效应晶体管)的简称。

$$Z_{o1} = \frac{1}{g_m + R_s^{-1}}. \quad (1)$$

由题意知, g_m^{-1} 为 1 V/mA 数量级. 在图 1.8 中, JFET 只需供给三极管的基流, 故 R_s 可选用较大的电阻. 为简便起见, 略去式①中的 R_s , 得

$$Z_{o1} \approx g_m^{-1} = 1 \text{ k}\Omega. \quad (2)$$

若不计 R_e , 则三极管跟随器的输出电阻为

$$Z_{o2} = r_e + \frac{Z_{o1} + r_b}{1 + \beta}. \quad (3)$$

若三极管的工作电流估计为 1 mA, 则 r_e 可估计为 26 Ω . 设 r_b 可估计为 300 Ω , 则有

$$Z_{o2} \approx 26 \Omega + \frac{1 \text{ k}\Omega + 300 \Omega}{1 + 50} \approx 51.5 \Omega. \quad (4)$$

按以上的估计, Z_{o2} 主要决定于 r_e 和 Z_{o1} .

1.3 若将习题 1.2 中的电压跟随器改为两级三极管跟随器, 输出电阻估计是多大?

解答 若把上题中的 JFET 以参数相同的三极管取代, 则电路如图 1.9 所示. 信号源的输出电阻 (200 k Ω) 将映射到 T_1 的输出端.

T_1 的工作电流可估计为

$$I_{e1} \approx 1 \text{ mA} / 50 = 20 \mu\text{A},$$

所以

$$r_{e1} \approx 26 \text{ mV} / 20 \mu\text{A} = 1.3 \text{ k}\Omega.$$

T_1 的输出电阻为

$$Z_{o1} = r_{e1} + \frac{200 \text{ k}\Omega + r_{b1}}{1 + \beta} \approx 5.2 \text{ k}\Omega,$$

T_2 的输出电阻为

$$Z_{o2} = r_{e2} + \frac{Z_{o1} + r_{b2}}{1 + \beta} \approx 1.4 \Omega.$$

即: 在信号源有高输出电阻时, 对电压跟随器的输出电阻有不可忽视的影响.

1.4 简述抑制放大器非线性失真的方法.

解答 (i) 首先, 要依据给定的技术指标估计管子的电压和电流的变化范围, 选择恰当的静态工作点, 使放大器不致产生饱和失真和截止失真;

(ii) 利用管外的线性元件抑制管子参数的非线性效应;

(iii) 利用互补的非线性效应抑制非线性失真, 例如发射极(源极)耦合的差分放大器.

1.5 转换速率是描述什么现象的参量? 电压跟随器是否也有转换速率?

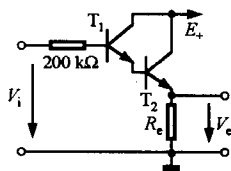


图 1.9

解答 转换速率(slew rate, 简称 SR, 又称波动率)是指放大器在快速变化的信号驱动下输出电压的最大上升或下降率. 它决定于负载电容和管子能输出的最大电流. 若输入快速信号, 要求输出电压的变化率超过转换速率时, 输出信号就有显著的非线性失真, 即管子可在某一段时间内进入截止态.

由于任何管子总有极间电容和分布电容, 负载也必有分布电容或呈容性. 任何组态的放大器的准线性工作区必受转换速率的限制.

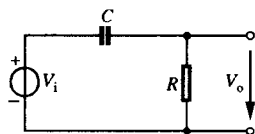


图 1.10

1.6 图 1.10 是一阶高通滤波器, 试求其传递函数, 并画出其波特图.

说明 本题只是要求读者练习画波特图.

解答 在频域, 该电路的传递函数为

$$H(j\omega) = \frac{R}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 - j(\omega RC)^{-1}}.$$

该电路的下界频为

$$f_L = 1/2\pi RC.$$

故有

$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L/f)^2}}, \quad (1)$$

$$\phi(f) = \arctan(f_L/f). \quad (2)$$

按照式①, 有

$$H(\text{dB}) = -10\log[1 + (f_L/f)^2]. \quad (3)$$

它的两条渐近线为

$$H(\text{dB}) = 0, \quad f > f_L,$$

$$H(\text{dB}) = 20(\log f - \log f_L), \quad f < f_L.$$

故幅频曲线如图 1.11 所示. 按照式②, 相频曲线大致如图 1.12 所示.

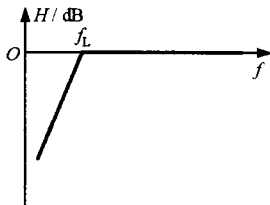


图 1.11

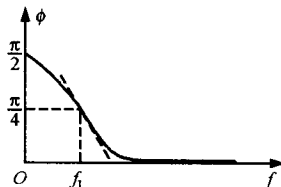


图 1.12

1.7 观察几种管子和集成电路商品, 了解器件的封装形式.

说明 本题只是提示学生要注意了解实际的器件, 尤其应注意不同的封装

各有什么特点.

1.8 晶体三极管、场效应管各有哪几种噪声? 管子的静态电流和电压对噪声有何影响?

说明 本题希望读者复习《电路分析》7.2.5, 8.3.5 小节和 § 10.5. 应该注意, 管子的静态电流与工作电流除直接与散粒噪声有关外, 还因与管压一起决定管芯的功耗, 从而影响芯片的温度. 它们不仅影响热噪声, 而且也影响器件中表面层分子(原子)的热运动, 即也影响闪烁($1/f$)噪声.