DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2014.11.019

放大电路频率特性的逆向启发式教学研究

韩跃平，毕满清，王黎明，杨　凌
（中北大学国家级电工电子实验教学示范中心，山西 太原　030051）

摘　要：“放大器的频率特性”是《模拟电子技术基础》课程中的教学难点，在学时分配有限的情况下该内容的教学方法是否得当将直接影响学生对于放大器特性的完整理解。遵照国内外主流教材，仍然以基本的单管共射放大电路为例，首先引出电路完整的电压放大倍数表达式，在启发学生思考中将频率特性的分析转变为对上、下限频率的简单求解；然后根据电容容抗的表达式对放大电路中的耦合电容与结电容进行分频段研究；分析RC低通、高通电路的频率特性及分别对应的上、下限频率，并很自然地引出晶体管的高频小信号Π形等效电路；最后根据学生的专业与学时有区别地化简等效电路，验证放大器的频率特性，得到放大电路的完整波特图。

关键词：模拟电子技术；放大电路；频率特性；教学方法
中图分类号：TN722-34；G642　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1004-373X(2014)11-0145-03

Research on reverse heuristic teaching methods about amplifying circuit frequency response

HAN Yue-ping, BI Man-qing, WANG Li-ming, YANG Ling
(National Electrical and Electronic Experimental Teaching Center, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Amplifier frequency response is one of the teaching difficult points in the course of “Analog Electronic Technology Foundation”. The teaching ways and means for this section will have direct impact on students comprehension towards amplifiers amplifying characteristic. Based on the mainstream teaching materials both at home and abroad, and taking the single transistor common emitter amplifier circuit as teaching example, an expression of the voltage amplifying factor is firstly introduced, and students are inspired to think about the simple solutions of upper and lower frequencies rather than frequency response. Then spectrum research method is used to study the coupling capacitance and the junction capacitance according to the expression of capacitive reactance. Thirdly, the frequency characteristics of RC low-pass circuit and the high-pass circuit are simply analyzed, thus the high frequency small signal Π equivalent circuit is naturally appeared. The simplied equivalent circuit is deduced discriminatively according to the student′s major and school. The amplifier frequency response is verified and the complete Potter figure is obtained finally.

Keywords: analog electronic technology; amplifying circuit; frequency response; teaching method

0　引　言

“放大电路的频率特性”是《模拟电子技术基础》课程中重要的内容之一，其教学方法是否得当将直接影响到学生对于放大电路放大特性的理解，进而影响电子信息类、通信类、自动控制类等学生对后续相关专业课程的学习，典型的如《信号与系统》等课程中的滤波器设计[1-2]。由于该章内容的理论性强、难点较多、数学推导繁琐，教师讲课难，学生对内容的掌握更难，因而在学时有限的情况下要将该章内容讲透、讲好是比较困难的。

随着电子技术的发展，模拟电子线路的主要内容已过渡到以集成电路为主，所以《模拟电子技术基础》课程中“放大器的频率特性”也应以讨论集成运放的频率特性为主。实际应用中，集成运放多数工作在深度负反馈状态，因此可根据反馈原理和增益带宽积为定常数这一特点求出其放大电路的频率特性。另一方面，集成运放是以分立元件的单元电路为基础，所以在国内外各高校的《低频电子线路课程》的教学中，仍然详细讨论分立元件单元电路的频率特性问题，并大多以单管共射放大电路为例研讨[3-5]。

通过多年的教学实践，逐渐摸索出了既易讲又易

收稿日期：2014-01-30
基金项目：国家自然科学基金(601171178)；山西省自然科学基金(2012011010-3)；2012年度山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划资助；中北大学教学改革资助

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

学，既与本校学生基础相适应，又比较适合电子技术发展要求的教学内容和教学方法。

1 放大电路频率特性的启发

图1是《模拟电子技术基础》中最基本的共射放大电路，也是国内外教材中介绍频率特性的经典电路。通过详尽的理论分析与繁琐的数学公式推导，可得出该电路完整的电压放大倍数表达式：

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{um}}{\left(1 - j\frac{f_L}{f}\right)\left(1 + j\frac{f}{f_H}\right)} \tag{1}$$

式中：$\dot{A}_{um}$ 是中频段（通带范围内）电压放大倍数；f_H，f_L 为上、下限截止频率；f 为输入信号频率。

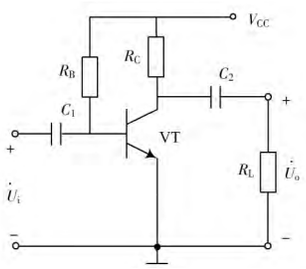

图1 基本的单管共射放大电路

从整个电子信息领域分析，公式（1）表达的信息说明，图1所示的共射放大电路可以看做是在通频带范围（$f_H - f_L$）内具有放大能力为 $\dot{A}_{um}$ 的带通滤波器。而 $\dot{A}_{um}$ 的分析计算在本课程的单级放大电路中已详细介绍。可见，在本章的教学中将公式（1）合理地前置引出，可以把对放大电路频率特性的学习困难转变为对电路上、下限截止频率的简单求解。教学中启发学生回忆在《电路基础》等课程中RC回路的上、下限截止频率的计算均按照以下形式：

$$f_{H,L} = \frac{1}{2\pi RC} \tag{2}$$

因此，讲授的重点就进一步转化为寻找 f_H 对应的高频区RC低通等效回路和 f_L 对应的低频区RC高通等效回路。

2 频率特性的分频段研究方法

放大电路的电压放大倍数之所以会成为频率的函数，是因为放大电路中存在电抗性元件，主要是电容元件，它们的容抗 $\dot{X}_C(=\frac{1}{j\omega C})$ 随频率的变化而变化（$\omega = 2\pi fC$）。实际上，放大电路中的电容可分为两类：一类是电容量比较大的耦合电容和射极旁路电容（用 C_1 表示），通常为几十到几百微法，它们只在低频时起作用；另一类是晶体管的结电容和线路分布电容（用 C_2 表示），它们的电容量很小，通常只有几到几百皮法或更小，只在高频时起作用。

（1）中频段，可理解为 ω 较大，且 C_1 也较大，故容抗 $|\dot{X}_{C1}|$ 很小，对串联回路不造成影响，可视为短路；同时，由于 C_2 很小，从而 $|\dot{X}_{C2}|$ 相对很大，其并联效应也可忽略，可视作开路。故在中频范围内，$\dot{A}_u$ 与 f 无关，特性是平坦的。

（2）低频段，ω 很小，$|\dot{X}_{C2}|$ 变得比中频段更大，其所在的并联支路仍然看作开路；随着 ω 的降低，$|\dot{X}_{C1}|$ 增大，它对输入信号的串联分压作用不可忽略，使得电压放大倍数的幅值减小，同时产生超前的附加相位移，最大可达 +90°。这时电路等效为具有某一下限频率 f_L 的RC高通电路。

（3）高频段，ω 很大，$|\dot{X}_{C1}|$ 变得比中频段更小，仍看作短路；随着 ω 的增大，$|\dot{X}_{C2}|$ 趋于有限值，它对输入信号的并联分流作用不可忽略，使得电压放大倍数的幅值减小，同时产生滞后的附加相位移，最大可达 −90°。这时电路等效为具有某一上限频率 f_H 的RC低通电路。

由上述分析可知，耦合电容与三极管结电容分别作用于放大电路的低频与高频段，不会同时起作用，f_H 和 f_L 的计算均可按照公式（2）从各自对应的RC回路中分别算得。

3 单时间常数RC电路的频率特性

单时间常数的RC电路是指由一个电容与一个电阻组成的，或者最终可以简化成由一个电容和一个电阻组成的RC等效电路，它们的时间常数 $\tau = RC$。虽然单时间常数RC电路很简单，但在设计和分析线性电路及数字电路时起着重要的作用。

（1）RC低通电路

图2为无源RC低通电路，其电压传输关系为：

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_H}} \tag{3}$$

式中 $f_H = \frac{1}{2\pi RC}$ 为低通电路的上限截止频率。

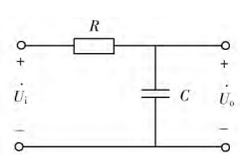

图2 RC低通电路

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（2）RC高通电路

图3为无源RC高通电路，其电压传输关系为：

$$\dot{A}_u=\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}=\frac{R}{R+\frac{1}{j\omega C}}=\frac{1}{1-j\frac{f_L}{f}} \tag{4}$$

式中 $f_L=\frac{1}{2\pi RC}$ 为高通电路的下限截止频率。

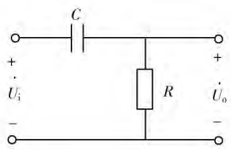

图3　RC高通电路

讲授至此，学生已经从理论上验证了公式（1）的合理性，剩下的工作就是解决图1电路对应的实际的高通与低通RC等效电路，然后由公式（2）分别求得实际的上、下限截止频率。

4　引出晶体管的高频小信号等效电路

此时向学生讲解，在研究单管共射放大电路的频率特性时包含了高频区，针对中低频区的 h 参数模型不再适用，据此从三极管的物理结构出发，适时引出混合参数Π形等效电路并简化。对该部分的讲解应根据学生的专业不同与实际学时区别，有选择地做详细或简单推导，得出单管共射放大电路对应的Π形等效电路如图4所示。

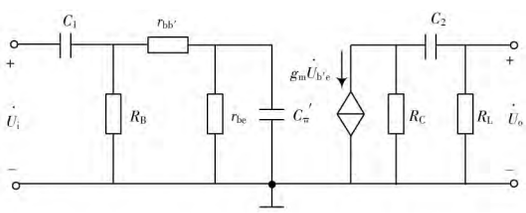

图4　单管共射放大电路的Π形等效电路

图4中，惟一未知的参数为 C'_π，可由下面公式求得：

$$C'_\pi=C_\pi+(1+|\dot{K}|)C_\mu \tag{5}$$

式中：$\dot{K}=-g_m R'_L$，$g_m\approx\frac{I_{EQ}(\text{mA})}{26(\text{mV})}$，$C_\pi=\frac{g_m}{2\pi f_T}$，$f_T$ 为晶体管的特征频率，其余参数可由晶体管手册查得。

由前述分频段分析，很容易启发学生得出Π形等效电路对应的高频、低频区等效电路如图5，图6所示。

由图5可计算得到上限频率：

$$f_H=\frac{1}{2\pi(r_{bb'}//r_{b'e})C'_\pi} \tag{6}$$

由图6可计算得到下限频率：

$$\begin{cases} f_{L1}=\dfrac{1}{2\pi[R_B//(r_{bb'}+r_{b'e})]C_1} \\ f_{L2}=\dfrac{1}{2\pi(R_C+R_L)C_2} \end{cases} \tag{7}$$

如果设计电路时一个下限频率远大于其他的下限频率，如 $f_{L2}\gg f_{L1}$，则 $f_L\approx f_{L2}$，如果二者接近，则按照后续章节多级放大电路总的上下限截止频率的计算公式求解。

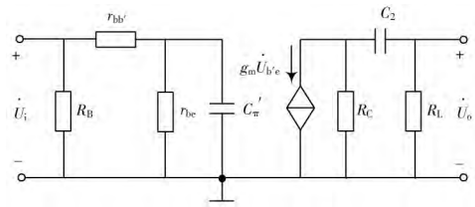

图5　高频时的低通等效电路

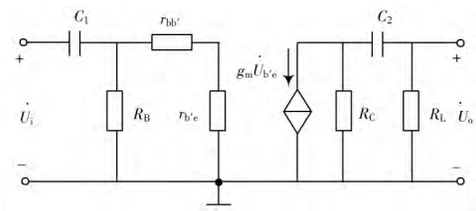

图6　低频时的高通等效电路

5　做出放大电路的完整波特图

根据前述分析，可以很轻松地作出单管共射放大电路的波特图，如图7所示。

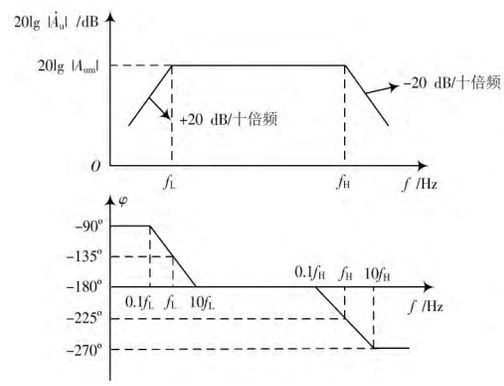

图7　共射放大电路的波特图

6　结　论

本文着眼于在有限的教学时间内，以更加有利于学生理解掌握的教学方法讲授放大电路的频率特性。实践证明，通过本文所探讨的教学方法，结合学校地方特色及不同专业学生的特点，在实际教学中取得了良好的效果，一定程度上缓解了学生学习放大电路频率特性的畏难情绪。

（下转第150页）

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

因素之一。煤炭行业的技术创新主要体现在企业新工艺、新技术、新材料、新装备、新的经营管理模式和生产方式，提高产品质量和经济效益，加强市场的竞争能力。在分配供应链利益时要对企业的技术创新程度加以考虑，对没有技术创新或技术创新低的企业进行惩罚，对有技术创新或技术创新高的企业加以奖励。还要综合考虑企业创新技术在整个供应链中的地位以及给供应链带来的利润。在计算过程中可以通过层次分析法等对技术进行评价。

2.4 权重设置

合作程度、技术创新值和风险值在利益分配时起到的作用不同，所以应该利用科学的方法设置合理的权重。在设定权重时可以采用直觉模糊法、层次分析法、德尔斐法等。

3 案例研究分析

选取榆林市某煤炭企业集团供应链作为研究对象，该供应链中的煤炭流通企业、煤炭消耗企业、煤炭生产企业基本能以煤炭均衡供给为运营目标。假设风险值 $c_1=(0.78,0.84,0.14)$，技术创新值 $t_1=(0.49,0.52,0.76)$，企业合作程度 $r_1=(0.72,0.69,0.40)$，三个因素的权重为 $m_1=0.39, m_2=0.28, m_3=0.033$，修正前总利益假设为10，则煤炭生产商、煤炭流通商、煤炭消耗企业的利益为：20，48，39，三个企业综合各个因素和相应权重后的值为：

$$w_1=\begin{bmatrix}0.78 & 0.84 & 0.14\\ 0.49 & 0.52 & 0.76\\ 0.72 & 0.69 & 0.40\end{bmatrix}\begin{bmatrix}0.39\\ 0.28\\ 0.33\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0.59\\ 0.59\\ 0.61\end{bmatrix}$$

$\Delta w_1=w_1-1/n$，Δw_1 表示在供应链分配利益时作为激励因素的综合因子，综合上述中的数值计算，得到煤炭生产商、煤炭流通商、煤炭消耗商三个企业合作后的利益分配值为：

$$\varphi(1)_1=\varphi(1)+v(1)\times\Delta w_1=4+10*(0.59-1/3)=6.6$$

$$\varphi(2)_1=\varphi(2)+v(1)\times\Delta w_1=3.5+10*(0.59-1/3)=6.1$$

$$\varphi(3)_1=\varphi(3)+v(1)\times\Delta w_1=3+10*(0.61-1/3)=5.8$$

4 结 语

本文结合煤炭供应链的基本结构特点，综合考虑了煤炭供应链中风险值、企业合作积极性、技术创新三个因素对供应链上各成员的收益分配的影响，提出了基于Shapley值法修正模型。并且以陕西省榆林市某煤炭集团的供应链为研究对象，对修正模型进行验证，通过验证发现修正后的模型对成员企业在合作中所作的努力程度和规避风险的措施有一定的影响，使利益分配更符合实际，研究成果更具现实指导意义。但是，技术创新、风险值等模型的参数值如何更加合理的确定尚需进一步研究。

参 考 文 献

[1] 马士华，王鹏.大型煤炭供应链集成决策模型及应用[J].计算机集成制造系统，2009，15(9)：1738-1742.

[2] 李巍巍，吴冲.基于Shapley值法和直觉模糊的煤炭供应链利益分配[J].黑龙江科技学院学报，2010，20(6)：483-487.

[3] 魏学成，李文涛.基于改进shapley值法的供应链联盟利益分配研究[J].统计与决策，2010(23)：53-55.

[4] 谭春桥.基于Choquet延拓具有区间模糊联盟n人对策的Shapley值[J].系统工程学报，2010，25(4)：451-458.

[5] 卢志刚，朱文瑾.基于修正区间模糊Shapley值信息产品供应链利益分配算法[J].计算机应用，2013，33(10)：2960-2963.

[6] 生延超.基于改进的Shapley值法的技术联盟企业利益分配[J].大连理工大学学报：社会科学版，2009，30(2)：34-39.

[7] 吕萍，张云，慕芬芳.总承包商和分包商供应链利益分配研究：基于改进的Shapley值法[J].运筹与管理，2012，21(6)：211-216.

[8] 雷勋平，Robin Qiu.基于改进Shapley值的四级供应链利润分配研究[J].计算机应用研究，2012，29(6)：2142-2144.

[9] 张云，吕萍，宋吟秋.总承包工程建设供应链利润分配模型研究[J].中国管理科学，2011，19(4)：98-104.

[10] 杜志平，胡贵彦，刘永胜.基于复杂性供应链脆弱性研究[J].中国流通经济，2011(6)：49-54.

作者简介：张 慧(1984—)，女，陕西人，硕士，讲师。研究方向为计算机应用、信息管理与信息系统。

(上接第147页)

参 考 文 献

[1] 许光，周斌，李坤，等.基于FilterPro和Proteus的带通滤波器设计[J].现代电子技术，2013，36(10)：24-30.

[2] 刘鑫，刘琪芳，高文华.有源低通滤波器仿真设计教学研究[J].电气电子教学学报，2013，35(3)：59-61.

[3] 童诗白，华成英.模拟电子技术基础[M].3版.北京：高等教育出版社，2001.

[4] 康华光.电子技术基础模拟部分[M].3版.北京：高等教育出版社，1999.

[5] 毕满清，王黎明，高文华，等.模拟电子技术基础[M].北京：电子工业出版社，2008.

[6] 徐聪，唐兴.平行耦合微带线带通滤波器的设计仿真与测试[J].现代电子技术，2013，36(23)：78-80.

作者简介：韩跃平(1974—)，男，山西人，副教授，博士。主要从事电子技术、信息探测与处理方面的教学与研究工作。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net