无源与有源网络的分析与综合

张欲敏　朱济杰　编

北京航空航天大学出版社

无源与有源网络的分析与综合

张欲敏　朱济杰　编

北京航空航天大学出版社

(京)新登字166号

内 容 简 介

本书是为无线电、电子、通讯类专业大学本科"网络分析与综合"课程编写的一本教材。内容讲述网络函数的性质及其可实现性，受激网络响应的分析，逼近函数与综合方法，频率变换与网络变换，RC有源网络的分析与综合，无源与有源网络的灵敏度分析等。

本教材在编写过程中侧重于揭示基本物理概念和工程实际应用的研究与分析，在本书最后给出了不少二阶与三阶RC有源网络的图表，利用这些基本网络型式，可以构成高阶RC有源网络。这将给实际设计工作提供很大方便。全书每章后面均附有习题及思考题。

本书除可作为本科生、硕士生教材及参考书外，还可供从事有关专业的工程技术人员参考。

无源与有源网络的分析与综合
WUYUAN YU YOUYUAN WANGLUO DE
FENXI YU ZONGHE
张钦敏 朱济杰 编
责任编辑 马晓虹
*
北京航空航天大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经售
北京农业工程大学印刷厂印装
*
850×1186 1/32 印张：13.25 字数：356 千字
1991年12月第一版 1991年12月第一次印刷 印数：2000册
ISBN 7-81012-273-8/TN·016 定价：4.10元

前　　言

在信息传输系统中，信号的形成、传输与处理，无一不是藉助于网络来完成，因而网络分析与网络综合理论在电子技术及其相关技术领域中占有相当重要的地位。

网络理论是一门较成熟的学科，然而科学技术的飞速发展，相关学科的相互渗透，新的概念不断引入，新的分析方法不断引用，业已并将进一步推动网络理论的发展，从而促使人们对其进行更加深入的研究。

理论是指导并服务于工程实际的，把理论应用到实践中去并获得满意的结果，这应是从事实际工作者的愿望。

零点与极点，这些复频域的术语，至今仍有不少人常常把它们作为数学的抽象概念，而不是作为设计参量。本书中阐明了复数零、极点与频率响应之间的关系，并建立了它们的图形之间的相互联系。

逼近函数与可实现性理论是网络综合中的理论基础。本书在注意到理论严密性的同时，还在相当大的程度上考虑到工程实用性。特别是揭示了各函数之间的内在联系和各自的特点，阐明了它们的基本物理概念。

有源网络是网络理论与电子技术的结合，近年来发展非常迅速，实际应用相当广泛，特别是在集成滤波网络方面，尤其如此。本书中介绍了具有有限增益或无限增益运算放大器在有源网络中的应用以及利用它控制和改善网络性能的基本方法，并提供了部分实用电路。

计算机的应用为网络分析与综合提供了强有力的工具。作为应用例证，我们曾编制了低通奇阶椭圆函数滤波网络计算机辅助

教学程序以及小于11阶的各类逼近特性滤波网络的工程实用程序。为便于教学，前者是以解析方式编制的，各个环节，相对独立，并附有主要设计公式及简要说明。由于篇幅所限，故程序未编入本书之内，读者如果需要，请直接与编者联系索取。

本书论述网络分析与网络综合的基本原理，但以网络综合原理为主。第一章介绍了有关复频域的基本概念以及描述网络特征的网络函数的定义、分类与性质。第二章及第三章研究了网络函数的性质及其可实现性。作为网络综合的基础，着重研究了策动点函数具有正实函数的性质及其检验准则。此外，对双口网络的转移函数的类型、性质进行了全面而深入的分析，显然，这部分内容具有重要的工程实用价值。第四章介绍了激励网络的各种方式及正确激励网络的方法。在此基础上，对受激网络所产生的各种类型的响应特性进行了较为全面而详尽的分析。

第五章及第六章着重介绍网络综合的全部过程。首先利用频率变换把对高通、带通、带阻网络的技术要求转换为对低通网络的要求；然后，选取合适的逼近函数逼近于所要求的低通特性。在第五章中研究了各种类型的逼近函数，包括巴特沃思逼近函数、切比雪夫逼近函数、考尔逼近函数以及贝塞尔逼近函数等。逼近函数在网络综合理论中占有特殊重要的地位，选取的逼近函数正确与否，几乎是决定所综合出的网络能否达到预期要求的关键。根据给定（或选取）的网络函数（或逼近函数）实现出网络结构，这是网络综合理论中又一重要内容。在第六章中研究了各种综合方法：包括福斯特综合法、考尔综合法、混合综合法、达林顿综合法等。比较起来，达林顿综合法具有更加重要的工程实用价值，但它是以上述几种综合法为基础的。一般来说，根据低通逼近函数综合出的网络结构是低通网络，尚必须利用网络变换的方法把低通型网络变换成为所要求实现的高通、带通、带阻型网络结构。在第六章中也介绍了各种类型网络之间的变换关系。限于篇幅，对于频率变换及网络变换的原理皆未作详尽的分析和

严密的公式推演，仅给出了它们衰减特性之间的对应关系和相应的变换关系式。对于工程设计，这是必不可少的。第七章对RC有源网络进行了分析，介绍了利用运算放大器作为受控源，通过受控源控制网络转移函数零、极点位置的方法，从而达到改善和控制网络特性的目的。本章中还对无源与有源网络的灵敏度进行了分析，包括绝对灵敏度、相对灵敏度的概念及表示方法；增益灵敏度、相位灵敏度、延时灵敏度与传输灵敏度之间的关系及其计算方法以及增益-灵敏度乘积等等。在本章最后，给出了不少二阶及三阶 RC 有源网络的图表，利用这些基本网络型式，可以构成高阶 RC 有源网络，这将给实际设计工作提供很大方便。全书每章后面，均附有习题及思考题。

本书是在原编教材《网络综合与宽带匹配》、翻译教材《有源与无源网络的分析与综合》以及讲义《网络综合基础》的基础上，考虑当前教学需要与要求加以综合改编而成。内容涉及无源网络、有源网络、网络分析、网络综合各个方面。考虑到对本科生、研究生的教学应在加强理论的基础上尽可能结合工程实际的要求以及课程学时数的限制，故本教材在编写过程中并未过分追求理论分析的严密性及完整性，而是侧重于揭示基本物理概念和工程实际应用的研究与分析。在章节先后次序的安排上，基本上是按照网络综合设计流程次序排列的。显然，这有利于建立各章节之间的内在联系，且符合工程设计习惯。这样考虑应该是适当的。

本书由航空航天工业部教材编审室组织编写、审定。全书由张欲敏、朱济杰编写。书中全部图表均由邓伟文绘制。

本书由北京理工大学李瀚荪教授主审，北京航空航天大学付维潭教授复审，他们都提出了很多宝贵的意见，在编写过程中得到了卢维扬教授的支持和鼓励，编者对此表示深切的感谢。

由于编者水平所限，书中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编　者

一九九一年二月

目　录

第一章　网络函数

第二章　策动点函数

第三章 转移函数

第四章　响应特性分析

第五章　频率变换与逼近函数

第六章 网络实现与网络变换

第七章 有源RC网络

第一章　网络函数

§1.1　概　　述

在信息传递过程中，信息寓于信号之中，为了使信号适合于在信道中传输，需要对信号进行必要的处理与变换。我们可以用网络来改变信号的特性。利用网络可使输入信号中希望存在的信号特征保留在输出信号之中，而把一切不需要的信号全部抑制掉，这样，可提高信息传递的有效性与可靠性。

网络理论包含两方面的内容，即网络分析与网络综合。

网络分析是已知网络的具体结构和元件参数，求解该网络在激励源作用下所产生的响应。就复频域而言，就是已知网络函数 $H(s)$ 求解激励源 $E(s)$ 作用下的响应 $R(s)$ 。

网络综合是已知激励信号及在其作用下所要求产生的响应，求解具体的网络结构和元件参数。就复频域而言，就是已知 $E(s)$ 、$R(s)$，求解 $H(s)$，并把 $H(s)$ 实现为具体的网络结构。

一般来说网络综合较之网络分析涉及的问题要多些、复杂些。例如：在网络分析中，已知 $E(s)$ 、$H(s)$ 求解 $R(s)$ ，答案是唯一的。而在网络综合中，已知 $E(s)$、$R(s)$，求解 $H(s)$，不仅答案不是唯一的，还涉及到 $H(s)$ 是否能实现的问题，况且即使能够实现，由于实现方法的不同，同一网络函数所求得的具体网络结构也不相同。所以，研究网络综合问题较之研究网络分析问题要复杂得多。

网络函数 $H(s)$ 是用来描述网络特性的，它在网络分析与网络综合中占有特殊重要地位。对于网络分析与网络综合，复数、复变函数是一种强有力的分析工具，因而在此领域内得到广泛而

深入的应用。为此，在研究网络函数之前，对复数、复频率、复平面等基本含义应进行必要的说明。

1.1.1 复　数

复数是由实数和虚数组成的，而虚数的概念起源于类似 $x^2+1=0$ 这样一种代数方程的求解。与实数不同，虚数本身与自然界的物理现象并没有直接的联系，传输信号的波长可以是 1 米、$\frac{1}{2}$ 米，但绝不可能有 $\sqrt{-1}$ 米。所以，在发现之初，$\sqrt{-1}$ 这个数包含有相当大的神密性。在十八世纪之后，经过许多人的努力，认识逐渐深入，$j=\sqrt{-1}$ 的重要性才愈来愈明显地表现出来。

虚数既然与物理现象没有直接的联系，那么它是怎样被引入到网络分析中来的？又是怎样与实际物理量联系起来的？换句话说，$j=\sqrt{-1}$ 既然不能直接代表任何实际物理量，它的含义究竟是什么呢？看来这是个熟悉而又陌生的问题。

我们知道，任何实数都是数轴上的一点，但虚数 j 却不是数轴上的任何一点，不过 $j^2=-1$ 却是数轴原点 0 左方的一点；但 $j^3=-j=-\sqrt{-1}$ 又不是数轴上的点，而 $j^4=1$ 却又是数轴原点 0 右方的一点。根据这一特点，我们可以把 j 看作一个算符，它的作用是把一个数环绕原点逆时针转动 $\frac{\pi}{2}$ (90°)，其关系如图1-1所示。

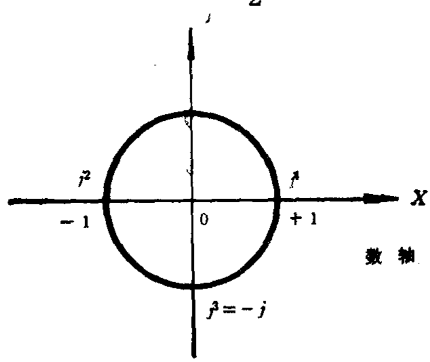

图1-1　虚数 j 示意图

设有两相互迭合的实数轴 $0X$ 与 $0Y$，假如我们把算符 j 作用于数轴 $0Y$ 上，它将使 $0Y$ 绕原点 0 逆时针方向转动 90°，成为虚数轴 jY。这样 $0X$ 与 $0Y$ 便构成了复数平面，如图1-2所示。

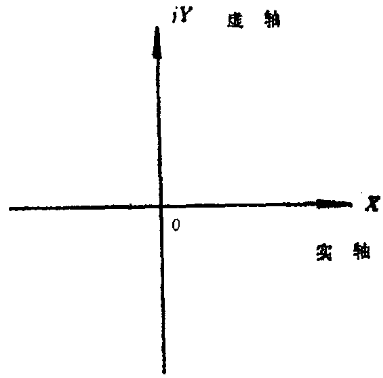

图1-2　复平面

复数平面也叫高斯平面。从表面看来，复数平面类似于直角坐标系的 $X0Y$ 平面。从性质上说，复数平面应是数轴的扩充。正如在 $X0Y$ 平面上的任何一点都代表一序数对一样，复数平面上的任何一点也对应于一个复数 $\mathbf{Z}$。

1.1.2　复频率

网络可以按照预先规定的要求改变输入信号的特性。任何一种信号都可认为是由弦波信号（正弦信号或余弦信号）组成的，所以弦波信号是一种最基本的信号型式：

$$f(t)=A\cos(\omega t+\theta) \tag{1-1}$$

当把这样的信号作用到网络上时，要直接计算在这种激励源作用下所产生的响应是比较麻烦的，但如果把弦波型信号写成指数形式，求解网络在指数型信号作用下的响应，这时描述网络特性的微积分方程变成了代数方程，就可很容易地求出它的响应了。指数型信号与弦波型信号的关系为

$$A\cos(\omega t+\theta)=\frac{1}{2}(|A|e^{j\theta}e^{j\omega t}+|A|e^{-j\theta}e^{-j\omega t})$$

$$=\frac{1}{2}(\mathbf{A}e^{j\omega t}+\overline{\mathbf{A}}e^{-j\omega t}) \tag{1-2}$$

式中　$\mathbf{A}=|A|e^{j\theta}$ 和 $\overline{\mathbf{A}}=|A|e^{-j\theta}$ 都叫作复数振幅，且 $\overline{\mathbf{A}}$ 与 $\mathbf{A}$ 互为共轭关系。若网络是线性网络，当被弦波信号激励时，可先分

别求出$Ae^{j\omega t}$和$\overline{A}e^{-j\omega t}$各自作用于网络时的响应，再利用叠加原理进行叠加，即可得出原弦波型信号引起的响应。

如上所述，弦波型信号可由互为共轭、形如$Ae^{j\omega t}$的指数型信号相加而得。不难理解，很多周期性和非周期性信号，也可利用傅氏分解将其分解为不同频率的形如$Ae^{j\omega t}$型信号之和。这些信号引起的响应，也可利用叠加原理由每个$Ae^{j\omega t}$型信号的响应叠加而得。由此可见，把$Ae^{j\omega t}$型信号作为最基本的信号型式进行分析是合理的。

应该注意，上面引出的指数型信号$|A|e^{j(\omega t+\theta)}$中，$\theta$与$\omega$本身既可取正值也可取负值（也包括零），显然，这已将频率由正实数扩展到包括负实数在内的整个实数域了。这一点必须引起足够的重视。

一般对网络特性的分析研究多是以复频率为变量在复平面内进行的，为此，我们还必须把实频率扩展到整个复数域，所以，还必须建立复频率的概念。

为了建立复频率的概念，我们先回顾一下早已熟悉的RLC网络的自由放电过程，如图1-3所示。

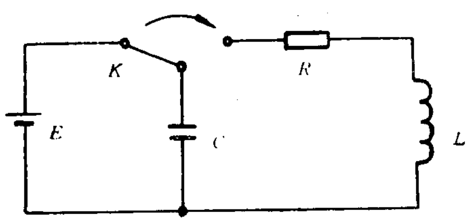

图1-3 RLC自由放电网络

在图1-3中，开关K先倒向左侧，待电容C上充电达到E伏时，再将开关倒向右侧，此时，就构成了RLC串联自由放电电路。一般描述此电路自由放电过程的微分方程式为

$$Ri+L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+\frac{1}{C}\int i\mathrm{d}t=0 \tag{1-3}$$

电路的初始条件为

$$i(0^+)=0; \qquad u_C(0^+)=E \tag{1-4}$$

式(1-3)为线性齐次方程，设它的通解为

$$i=Ie^{st} \tag{1-5}$$

将式(1-5)代入式(1-3)中，得

$$RIe^{st}+sLIe^{st}+\frac{1}{sC}Ie^{st}=0$$

即 $$\left(R+sL+\frac{1}{sC}\right)Ie^{st}=0$$

因为 $$Ie^{st}\neq 0$$

所以 $$R+sL+\frac{1}{sC}=0$$

将上式整理后得

$$s^2+\frac{R}{L}s+\frac{1}{LC}=0 \tag{1-6}$$

式(1-6)称为特征方程式，求解 s 为

$$s_{1,2}=-\frac{R}{2L}\pm j\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{R^2}{4L^2}}$$

设$\frac{1}{LC}>\frac{R^2}{4L^2}$，即 $R<2\sqrt{\frac{L}{C}}$，则上式可表示为

$$s_{1,2}=\alpha\pm j\beta$$

式中 $$\alpha=-\frac{R}{2L} \qquad \beta=\sqrt{\frac{1}{LC}-\frac{R^2}{4L^2}}$$

此时电源 i 的表示式应为

$$i=I_1e^{s_1t}+I_2e^{s_2t}=I_1e^{\alpha t}e^{j\beta t}+I_2e^{\alpha t}e^{-j\beta t} \tag{1-7}$$

式(1-7)中的系数I_1、I_2，可由式(1-4)给出的初始条件求得。将$t=0$，$i(0^+)=0$的条件代入式(1-7)，可求出

$$I_1+I_2=0$$

所以 $$I_1=-I_2$$

又因$t=0$时，$u_C(0^+)=E$，这表明在此瞬间回路内没有电流，因而在电阻R上没有压降，显然，此时电感上的电压等于电容上的电压，即