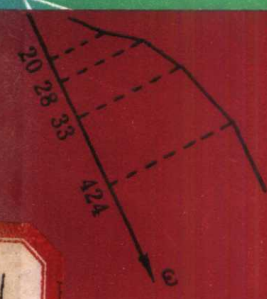
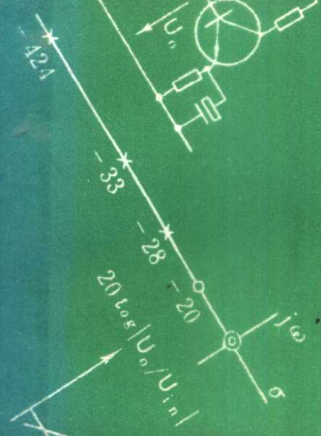
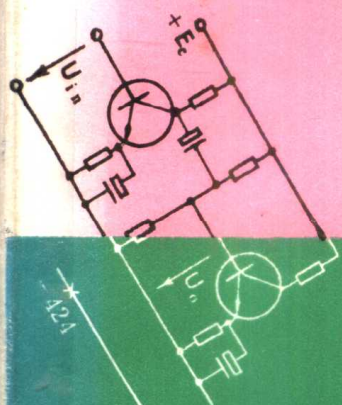


电子技术丛书



电子电路的频响分析

——零极点分析法

李拔强 编著

广东科技出版社

电子技术丛书

电子电路的频响分析 ——零极点分析法

李拔强

广东科技出版社

电子技术丛书
电子电路的频响分析
——零极点分析法

李拔强



广东科技出版社出版

广东省新华书店发行

韶关新华印刷厂印刷

787×1092毫米32开本 9.5印张 180,000字

1982年6月第1版 1982年6月第1次印刷

印数 1 — 7,500册

统一书号 15182·28 定价 0.90元

出版说明

电子技术是新兴的前沿科学。近几十年来，电子技术的发展日新月异，许多人把电子技术水平作为衡量一个国家的现代化水平的标志。因此，普及电子技术与实现四个现代化有着密切的关系，而电子工业的发展是实现四个现代化的物质技术基础的重要组成部分。为了在提高整个中华民族的科学文化水平的斗争中，为普及电子技术作出应有的贡献，我们编辑出版了《电子技术丛书》。

这套丛书由冯秉铨教授主编。力求坚持以马克思主义的辩证唯物主义和历史唯物主义为指导，结合各个专题，阐述当前国内外研究电子和电磁场运动、电路理论和实践，以及信息传输系统的一般规律及其应用技术，通俗地介绍这些方面的客观规律和技术经验；同时也介绍有关的电子元件、器件、设备和系统，普及这些方面的技术知识，以促进电子技术更加广泛地应用于国民经济、国防和科学技术的各个领域。

本丛书既着眼于当前，也着眼于未来，从国内现有实际技术水平出发，又要有所提高。以具有中等文化水平的工人、技术人员，以及从事电子工业生产和科研的有关人员为主要对象，也可供高等院校、中专电子学专业的师生和业余爱好者参考。

前 言

要全面地衡量一个电子电路的性能，除了分析中频段放大倍数、输入阻抗、输出阻抗等各项指标之外，还必须知道电路对信号的响应情况。电路对信号的响应有两种表示方法，一种是电路对正弦信号的稳态响应，即频率响应；另一种是电路对信号的瞬态响应，亦叫时间响应。由于这两种表示方法有固有的内在联系，知道了其中一种，就可以推得另外一种，而频率响应测试方便，而且容易测得准确的结果。因此，在电子电路中，频率响应这一指标具有重要的意义。

频率响应的定义，通常是指传输系数(输出和输入之比)和频率的关系。随着电路复杂性的增加，这一关系将会变得相当复杂，对分析和设计都会带来一定的困难。因此，如何简化分析、提高分析和设计的速度，一直是人们所十分关注的问题。可以认为：零极点法是能够满足上述要求的一种较好的方法，用它来分析电路对信号的响应，分析速度之快是其他方法所难以比拟的。为了使这种方法能够得到推广和普及，本书从实际电路入手，用通俗的形式去阐明零极点法的物理实质。除第四章外，所有各章都只用到初等数学的内容，具有中等程度的读者都可以读懂这些内容。

本书和已出版的丛书之一《电子电路分析和计算——参数分析法》是彼此相关的两本书，它们各自概括了电子电路指标计算的两大方面，同时由于参数分析法分解复杂电路简易而迅速，所以本书的部分分析是引用前书的分析结果。为

了使用方便，在本书的附录中，重印了前书的部分附录，以供查阅。

本书的第一章介绍了零极点法的基本概念，是全书最基本、最重要的一章。第二章介绍了分析频响的几种方法，其中重点放在快速简易的分析方法上。第三章叙述零极点法在分析反馈放大器频响和稳定性方面的应用。第四章是瞬态响应的分析，重点放在稳态和瞬态的联系上，虽然引用了拉普拉斯变换，但数学运算和推导并不多，整个分析主要借助于查阅拉氏变换表，一般读者对这一章在阅读上如果感到困难，可以略过，而不会影响全书的连贯性。第五章介绍了零极点法在逼近理论、综合以及有源滤波器设计方面的应用，有助于开拓思路。

本书的编写得到有关方面的关怀和支持，为编写工作提供了良好的条件。本书的插图工作得到陈金城同志的协助。谨此表示衷心的感谢。

冯秉铨教授生前，对编者编写的这本小册子给以鼓励和支持，并审阅了全书初稿，使本书避免了许多不当的地方，谨此致以深切的悼念。

限于编者水平，书中一定还会有不妥或错误的地方，请读者不吝指正。

一九八〇年十一月 于华南工学院

内 容 简 介

本书是电子技术丛书之一。它着重介绍了零极点法的基本概念，并以此为依据介绍了分析频响的几种方法，以及零极点法在分析放大器频响和稳定性方面的应用。此外，本书还介绍了零极点在瞬态响应分析、逼近理论、电路综合以及有源滤波器设计方面的应用。

本书可供从事无线电、电子仪器、自动控制等方面工作的工人、工程技术人员，以及中等、高等院校师生参考。

目 录

第一章 零极点分析法基本概念	(1)
一、问题的提出	(1)
二、传输系数的零极点	(4)
三、零极点的形式及其与信号传输的关系	(9)
四、应用举例	(48)
第二章 电子电路频响的分析方法	(78)
一、晶体管小信号高频等效模型	(78)
二、分析放大器频响的一般方法	(90)
三、分别开路、短路法	(97)
四、近似求解截止频率的系数法	(111)
五、系数法应用例子	(122)
六、多级放大器频响的计算	(133)
第三章 反馈放大器	(138)
一、分析方法概述	(138)
二、反馈放大器频响指标的分析	(144)
三、稳定性问题及校正网络设计	(187)
第四章 放大器的瞬态分析	(220)
一、拉普拉斯变换理论简介	(221)
二、放大电路的瞬态分析	(226)
第五章 零极点概念在其他方面的应用	(250)
一、逼近理论的物理概念	(250)
二、电路综合的物理概念	(259)
三、有源滤波器的设计问题	(267)
结束语	(275)

附录.....	(277)
一、基本电路单元参数表.....	(277)
二、指标计算公式.....	(288)
三、各种参数关系转换表.....	(289)
四、多项式系数 a_1/a_0 和 a_{n-1}/a_n 与电路结构的关系....	(290)

第一章 零极点分析法基本概念

什么是零极点法呢？初听起来，不知道指的是什么。其实，这种方法有它直观的物理实质，一旦了解它以后，就会感到这种方法简单而实用，分析响应问题相当简捷。下面先谈谈它的一些基本概念。

一、问题的提出

研究电路对信号传输的响应，是电子电路分析和设计的重点。但是，要求解答一个电路的频率响应和绘出频响曲线，却往往需要经过一番相当烦琐的推导和演算，并对每个频率求出响应值，才能在坐标纸上画出频响曲线，直观地看出信号的传输情况。通常，这并不是那么轻易的事。

举一个简单电路为例，如图 1—1 中所示的电路，是音频放大器中常用的单元电路之一。根据不同的要求，设计成低音频提升电路，或为了提高放大器的稳定性，作相位补偿之用。

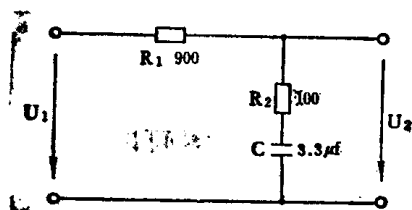


图 1—1 低音频提升电路

由欧姆定律很容易求出这个电路的电压传输系数为

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R_2 + 1/j\omega C}{R_1 + R_2 + 1/j\omega C} = \frac{1 + j\omega CR_2}{1 + j\omega C(R_1 + R_2)} \quad (1-1)$$

显然, 从上式直接看出信号的传输情况是困难的, 因此, 通常把传输系数分解为振幅和相角两项, 并在坐标纸上绘成曲线, 这样得到的曲线分别叫做幅频特性曲线和相频特性曲线。分解式(1-1), 得

$$\dot{K}_U = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)} \quad (1-2)$$

$$K(\omega) = \frac{\sqrt{1 + (\omega CR_2)^2}}{\sqrt{1 + [\omega C(R_1 + R_2)]^2}} \quad (1-3)$$

$$\varphi(\omega) = \text{tg}^{-1}(\omega CR_2) - \text{tg}^{-1}[\omega C(R_1 + R_2)] \quad (1-4)$$

振幅和相角都是频率 ω 的函数, 可以用符号 $K(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 表示, 并分别叫做幅频特性和相频特性。顺便指出, 在电子电路中, 因幅频特性用得特别多, 故通常所指的频率特性或频率响应, 实际上是指幅频特性, 而把相频特性叫做相位特性。严格地说, 频率响应应当同时包括这两种响应。

为了直观地看出信号的传输情况, 还必须把式(1-3)和式(1-4)画成曲线形式。为此, 可以对式(1-3)和式(1-4)取不同的 ω 值, 并代入元件的数值计算, 现将结果列于表1-1。

表 1-1 幅频特性和相频特性

表1-1

ω	0	100	300	600	1200	1800	2400	3000	6000	12000	∞
$K(\omega)$	1	0.95	0.71	0.46	0.26	0.19	0.16	0.14	0.11	0.10	0.10
$\varphi(\omega)$	0°	$-16^\circ.5$	$-39^\circ.3$	$-52^\circ.1$	$-54^\circ.2$	$-49^\circ.5$	$-44^\circ.2$	$-39^\circ.3$	$-23^\circ.7$	$-12^\circ.5$	0

图1—2乃是根据表1—1的数据而绘制的幅频响应特性和相频响应特性。可以看出，上述的方法是很费时的，因为它必须经历三个步骤：第一，求出电路的传输系数；第二，由传输系数求解幅频特性表示式 $K(\omega)$ 和相频特性表示式 $\varphi(\omega)$ ；第三，对每个频率 ω ，计算 $K(\omega)$ 和 $\varphi(\omega)$ 的数值，然后绘成曲线。

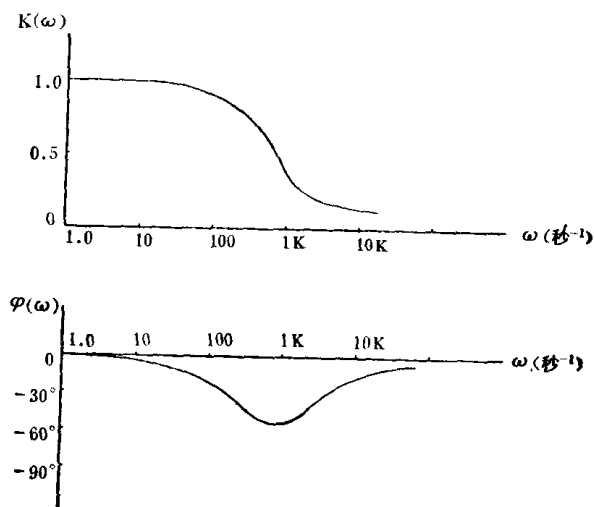


图1—2 图1—1电路的幅频特性和相频特性

对简单电路的分析尚且这样麻烦，可以想象，若电路稍为复杂，分析的困难程度是可想而知的。因此，简化分析、提高分析和设计的速度，一直是人们非常关注的课题，零极点法正是从这一需要出发，对传输特性总结而得出的一种方法。

二、传输系数的零极点

什么叫零极点，它和信号传输有什么关系？这是讨论问

题的一个重点。

为了解决这个问题，可以先来弄清什么叫零极点。不妨先看一个简单的电路，以图1—3的耦合电路为例，这个电路的电压传输系数等于

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R}{R + 1/j\omega C} = \frac{j\omega CR}{1 + j\omega CR} \quad (1-5)$$

上式的R和C是电路常数，式的唯一变量是频率 ω ，而变量 ω 和j的乘积 $j\omega$ 当然也是变量。若引用新变量p代替变量 $j\omega$ ，则式(1—5)变为

$$\dot{K}_U = \frac{pCR}{1 + pCR} = \frac{p}{p - (-1/CR)} = \frac{p}{p - p_1} \quad (1-6)$$

式中 $p_1 = -1/CR$ 。

由式可见，当 $p = 0$ 时，传输系数 $\dot{K}_U$ 等于零，而当 $p = p_1$ 时，传输系数 $\dot{K}_U$ 将等于无限大。可以把传输系数等于零所对应的p值叫做传输系数的零点，而把传输系数等于无限大时所对应的p值叫做传输系数的极点。因此，对于式(1—6)来说，零点是0，极点是 p_1 。

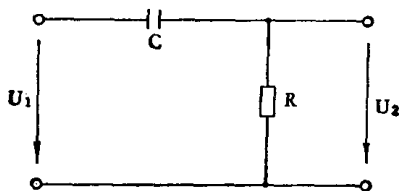


图1—3 RC耦合电路

再看一个电路，以图1—4中的RLC谐振电路为例，电路的传输系数为

$$\begin{aligned}\dot{K}_Z &= \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} = \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \frac{1}{j\omega}L + j\omega C} \\ &= \frac{1}{C} \cdot \frac{j\omega}{(j\omega)^2 + \frac{1}{CR_p}(j\omega) + \frac{1}{LC}}, \quad (1-7)\end{aligned}$$

以 p 代 $j\omega$, 得:

$$\dot{K}_Z = \frac{1}{C} \cdot \frac{p}{p^2 + p \frac{1}{CR_p} + \frac{1}{LC}}. \quad (1-8)$$

这里说明的是, 输入量和输出量可以是电压也可以是电流, 根据电源和负载的性质以及分析设计的需要, 传输系数有四种组合形式: 电压传输系数 $\dot{K}_U$, 电流传输系数 $\dot{K}_I$, 传输阻抗 $\dot{K}_Z$ 和传输导纳 $\dot{K}_Y$ 。为了讨论方便起见, 如不要求特别指明是哪一类传输系数时, 本书采用符号 $G(j\omega)$ 统一代表这四种传输系数。

因此式(1-8)可写成

$$G(j\omega) = \frac{1}{C} \cdot \frac{p}{p^2 + p \frac{1}{CR_p} + \frac{1}{LC}}. \quad (1-8)$$

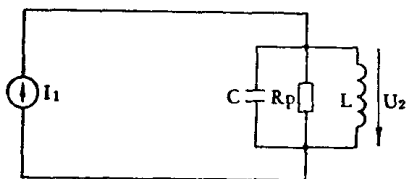


图 1—4 RLC 谐振电路

可见, $p=0$ 是 $G(j\omega)$ 的零点, 而满足分母因式等于零的根, 便是 $G(j\omega)$ 的极点。为此, 可对二次方程求根:

$$p^2 + p \frac{1}{CR_p} + \frac{1}{LC} = 0,$$

解上式，得

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2CR_p} \pm \sqrt{\left(-\frac{1}{2CR_p}\right)^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (1-9)$$

当电路参数变化时，上式可以采取不同的形式。

①当 $\frac{1}{2CR_p} > \frac{1}{LC}$ 时， $p_{1,2}$ 如式 (1-9) 所示，是两个不相等的负实根。

②当 $\frac{1}{2CR_p} = \frac{1}{LC}$ 时，

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2CR_p}. \quad (1-10)$$

此时 $G(j\omega)$ 有两个相等的负实根。

③当 $\frac{1}{2CR_p} < \frac{1}{LC}$ 时，式 (1-9) 可写为

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2CR_p} \pm j\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{1}{2CR_p}\right)^2}, \quad (1-11)$$

此时 $p_{1,2}$ 是两个共轭的复数根。

④当 $R_p = \infty$ 时，

$$p_{1,2} = \pm j\sqrt{\frac{1}{LC}}, \quad (1-12)$$

$p_{1,2}$ 为两个共轭虚数根。

由此可见，当电路参数变化时，传输系数的极点可能是实数，也可能是复数或虚数。可以预料，对于某些电路，也一定会找到复数零点和虚数零点。

以数学的观点看一个数，复数是一个最全面的数。因此，零点和极点只可能取三种形式，即实数、复数和虚数。

以上是两个简单电路的零点和极点的情况，对于更复杂的电路，例如由多级放大器组成的电路，其中可能有不止一个，如图1—3中的耦合电路，以及图1—4的谐振电路。显然，这时电路总的传输系数便会包含多个零点和多个极点。根据零极点的定义，可以写出具有 m 个零点和 n 个极点时，传输系数的一般表示式：

$$G(j\omega) = H \frac{(p - p_{z1})(p - p_{z2}) \cdots (p - p_{zm})}{(p - p_{p1})(p - p_{p2}) \cdots (p - p_{pn})} \quad (1-13)$$

$$= \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \cdots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \cdots + a_1 p + a_0} \quad (1-14)$$

式中 $H = \frac{b_m}{a_n}$,

p_{zm} ——零点($m = 1, 2, \cdots, m$) ;

p_{pn} ——极点($n = 1, 2, \cdots, n$)。

一般情况下， p_{zm} 和 p_{pn} 可以是实数，也可以是复数或虚数。为了迅速判明零极点的情况，在根的个数比较多时，采用坐标图表示零极点是最直观的。然而由于零极点具有复数这一形式，所以坐标平面不能采用实数平面，而必须采用复数平面，即横坐标为实数轴 σ ，纵坐标为虚数轴 $j\omega$ 的平面。图1—5便是零极点分布的示意图。

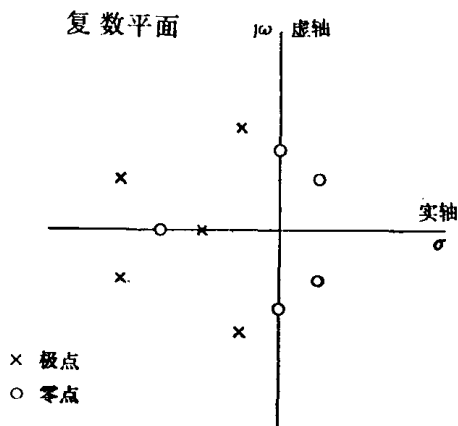


图1—5 零点、极点分布图
以 $\times$ 表示极点，以 o 表示零点