



普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套参考书

高频电子线路

第五版

学习指导书

张肃文 著



高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套参考书

高频电子线路

第五版

学习指导书

张肃文 著

高等教育出版社

内容简介

本书是为配合张肃文主编的《高频电子线路》(第五版)编写的学习指导书。

根据本书作者数十年从事电子线路的教学经验,本书每章均指出原书[即《高频电子线路》(第五版)]的内容要点、重点与难点,各章均有解题示例与习题解答,以帮助学习者学习好这门重要的电子类专业技术基础课。

本书可作为高等学校电子信息工程与通信工程专业师生的参考书,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高频电子线路(第五版)学习指导书/张肃文著. —北京:
高等教育出版社, 2009. 12
ISBN 978-7-04-027968-9

I. 高… II. 张… III. 高频-电子电路-高等
学校-教学参考资料 IV. TN710.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第181680号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 吴陈滨 封面设计 于涛 责任绘图 尹文军
版式设计 范晓红 责任校对 姜国萍 责任印制 朱学忠

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总机 010-58581000

经销 蓝色畅想图书发行有限公司
印刷 河北新华印刷一厂

开本 787×960 1/16
印张 23.75
字数 440 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版次 2009年12月第1版
印次 2009年12月第1次印刷
定价 28.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 27968-00

序 言

“高频电子线路”是高等学校电子信息工程与通信工程专业的重要技术基础课。笔者一直从事高等学校的教学与科研工作,从事“电子线路”的教学几十年,所主编的《高频电子线路》(第一版)于1980年问世以来,现已出至第五版。为了帮助学习者更好地学习该书第五版,特编写本书,以供参考。

为了便于读者使用,本书的章次与《高频电子线路》(第五版)相同,分为12章。每章分为:学习目的,内容要点,本章重点与难点,解题示例,思考题与习题解答等五节。

作者根据多年来的教学体会,指出每章学习应达到的目的,对不同内容的学习要求分为:掌握、熟悉、理解与了解四个不同层次。

应掌握的是基本概念与原理;重要内容与基本公式必须熟悉;某些较繁杂的内容与公式应予以理解;对于某些次要内容则只要求了解。

内容要点扼要综述了各章的主要内容。为了便于读者掌握每章的重点与难点,书中也单列出一节。

解题示例是为扩展学习者的思路而编写的,有些例题还适当扩展了原书[即《高频电子线路》(第五版)]的内容。

每章最后部分为原书的全部思考题与习题详解。但作者建议,学习者只有在感到十分困惑时,才参看这些解答。通常以自己独立解答为最佳方式,以本书的解答作为核对之用。本书共有例题85个,习题219个,合计304题。

在编写此书时,曾参考并选用了作者主编,陈惠中、张惠敏、严国萍、胡长阳参编的《电子线路题解分析》(湖北科学技术出版社1989年出版)的部分内容。

谨对以上同志致以衷心的感谢。

本书如能对学习者学习“高频电子线路”课程有所帮助,则笔者将感到非常欣慰与荣幸。

书中难免有疏漏与不当之处,恳请读者不吝指正,预致谢忱。

张肃文

2009年5月于武汉大学

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 学习目的	1
§ 1.2 本章重点	1
第 2 章 选频网络	2
§ 2.1 学习目的	2
§ 2.2 内容要点	2
2.2.1 串联谐振回路	2
2.2.2 并联谐振回路	3
2.2.3 串、并联电路的阻抗互换与抽头电路的阻抗互换	5
2.2.4 耦合回路	8
2.2.5 其他形式的滤波器	12
§ 2.3 本章重点与难点	13
2.3.1 本章重点	13
2.3.2 本章难点	13
§ 2.4 解题示例	13
§ 2.5 思考题与习题解答	23
第 3 章 高频小信号放大器	37
§ 3.1 学习目的	37
§ 3.2 内容要点	37
3.2.1 高频小信号放大器的主要质量指标	37
3.2.2 晶体管高频小信号等效电路与参数	38
3.2.3 单调谐回路谐振放大器	43
3.2.4 多级单调谐回路谐振放大器	45
3.2.5 双调谐回路谐振放大器	46
3.2.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施	47
* 3.2.7 场效应管高频小信号放大器	51
3.2.8 放大器中的噪声	52
3.2.9 噪声的表示和计算方法	55
§ 3.3 本章重点与难点	60
3.3.1 本章重点	60
3.3.2 本章难点	60

§ 3.4 解题示例	61
§ 3.5 思考题与习题解答	68
第 4 章 非线性电路、时变参量电路和变频器	91
§ 4.1 学习目的	91
§ 4.2 内容要点	91
4.2.1 非线性元件的特性曲线	91
4.2.2 分析非线性电路的方法	91
4.2.3 线性时变参量电路	92
4.2.4 变频器的工作原理	93
4.2.5 晶体管混频器	93
4.2.6 二极管混频器	95
4.2.7 混频器的干扰	96
4.2.8 外部干扰	98
§ 4.3 本章重点与难点	98
4.3.1 本章重点	98
4.3.2 本章难点	98
§ 4.4 解题示例	98
§ 4.5 思考题与习题解答	103
第 5 章 高频功率放大器	123
§ 5.1 学习目的	123
§ 5.2 内容要点	123
5.2.1 高频功率放大器与低频功率放大器的异同点	123
5.2.2 谐振功率放大器的工作原理	123
5.2.3 动态特性与负载特性	125
5.2.4 晶体管功率放大器的高频特性	129
5.2.5 高频功率放大器的电路组成	129
5.2.6 丁类(D类)功率放大器	133
5.2.7 戊类(E类)功率放大器	135
5.2.8 宽带高频功率放大器	137
5.2.9 功率合成器	140
5.2.10 晶体管倍频器	144
§ 5.3 本章重点与难点	145
5.3.1 本章重点	145
5.3.2 本章难点	145
§ 5.4 解题示例	145
§ 5.5 思考题与习题解答	154
第 6 章 正弦波振荡器	170

§ 6.1 学习目的	170
§ 6.2 内容要点	170
6.2.1 LC 振荡器的基本工作原理	170
6.2.2 振荡器的平衡与稳定条件	171
6.2.3 反馈型 LC 振荡器线路	172
6.2.4 振荡器的频率稳定问题	174
6.2.5 石英晶体振荡器	175
6.2.6 负阻振荡器	177
6.2.7 几种特殊振荡现象	179
6.2.8 集成电路振荡器	180
6.2.9 RC 振荡器	181
§ 6.3 本章重点与难点	182
6.3.1 本章重点	182
6.3.2 本章难点	183
§ 6.4 解题示例	183
§ 6.5 思考题与习题解答	200
第 7 章 振幅调制与解调	223
§ 7.1 学习目的	223
§ 7.2 内容要点	223
7.2.1 调幅波的基本性质与功率关系	223
7.2.2 平方律调幅	225
7.2.3 斩波调幅	226
7.2.4 模拟乘法器调幅	228
7.2.5 单边带信号的产生	230
7.2.6 残留单边带调幅	232
7.2.7 高电平调幅	233
7.2.8 包络检波	235
7.2.9 同步检波	237
7.2.10 单边带信号的接收	239
§ 7.3 本章重点与难点	240
7.3.1 本章重点	240
7.3.2 本章难点	240
§ 7.4 解题示例	240
§ 7.5 思考题与习题解答	252
第 8 章 角度调制与解调	264
§ 8.1 学习目的	264
§ 8.2 内容要点	264

8.2.1 调角波的性质	264
8.2.2 调频的方法	270
8.2.3 相位鉴频器	279
8.2.4 比例鉴频器	283
8.2.5 其他形式的鉴频器	284
§ 8.3 本章重点与难点	288
8.3.1 本章重点	288
8.3.2 本章难点	288
§ 8.4 解题示例	289
§ 8.5 思考题与习题解答	296
第9章 数字调制与解调	311
§ 9.1 学习目的	311
§ 9.2 内容要点	311
9.2.1 数字通信的基本概念	311
9.2.2 振幅键控	312
9.2.3 移频键控	312
9.2.4 移相键控	313
9.2.5 正交调幅与解调	319
§ 9.3 本章重点与难点	320
9.3.1 本章重点	320
9.3.2 本章难点	320
§ 9.4 思考题与习题解答	320
第10章 反馈控制电路	324
§ 10.1 学习目的	324
§ 10.2 内容要点	324
10.2.1 自动增益控制(AGC)	324
10.2.2 自动频率微调(AFC)	325
10.2.3 锁相环路的基本工作原理	328
10.2.4 锁相环路的数学模型	329
* 10.2.5 锁相环路的分析	334
* 10.2.6 锁相环路应用简介	338
§ 10.3 本章重点与难点	341
10.3.1 本章重点	341
10.3.2 本章难点	342
§ 10.4 解题示例	342
§ 10.5 思考题与习题解答	345

第 11 章 频率合成技术	351
§ 11.1 学习目的	351
§ 11.2 内容要点	351
11.2.1 频率合成器的主要技术指标	351
11.2.2 频率直接合成法	351
11.2.3 频率间接合成法(锁相环路法)	354
11.2.4 集成频率合成器	360
§ 11.3 本章的重点与难点	362
11.3.1 本章重点	362
11.3.2 本章难点	362
§ 11.4 解题示例	362
§ 11.5 思考题与习题解答	364
第 12 章 电子设计自动化(EDA)与软件无线电技术简介	369
§ 12.1 学习目的	369
§ 12.2 内容要点	369
§ 12.3 本章难点与重点	369

第 1 章 绪 论

§ 1.1 学习目的

1. 了解无线电通信发展简史。
2. 建立无线电信号的发送与接收的初步概念,作为学习原书^①以后各章的基础。
3. 一般了解通信的传输媒质。

§ 1.2 本章重点

本章重点为原书的图 1.2.8 与图 1.2.11,必须牢固记忆。其余部分一般了解即可。

^① “原书”即指《高频电子线路》(第五版)。以下同。

第2章 选频网络

§ 2.1 学习目的

1. 掌握串联与并联谐振回路的主要性能：
谐振条件与谐振曲线，通频带， Q 值的意义；信号源内阻与负载阻抗对谐振回路的影响。
2. 掌握两种谐振回路的阻抗互换与抽头的阻抗变换。
3. 熟悉互感耦合回路的主要性能：反射阻抗的物理意义，欠耦合、过耦合与临界耦合，谐振曲线。
4. 了解其他形式的滤波器，主要是石英晶体滤波器的特性。

§ 2.2 内容要点

2.2.1 串联谐振回路

由 R 、 L 、 C 组成的串联回路，谐振条件为

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$$

因而串联谐振频率为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.2.1)$$

此时，回路阻抗等于 R ，达到最小，回路电流则达到最大。 L 与 C 两端的电压降将等于信号源电压 V_s 的 Q 倍，因而称为电压谐振。

$$\text{品质因数} \quad Q = \frac{\omega L}{R} = 2\pi \frac{\text{回路储存能量}}{\text{每周消耗能量}} \quad (2.2.2)$$

$$\text{回路通频带} \quad 2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q} \quad (2.2.3)$$

串联谐振回路的谐振曲线与通频带示意图见图 2.2.1。

串联谐振回路适用于信号源内阻低的情况。信号源内阻越大，回路品质因数 Q 越低，谐振曲线越钝，选择性也就越差。

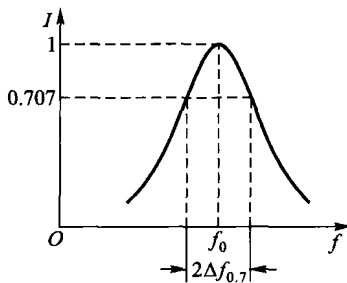


图 2.2.1 串联谐振回路的谐振曲线与通频带

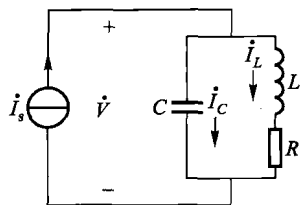


图 2.2.2 并联振荡回路

2.2.2 并联谐振回路

图 2.2.2 所示的并联回路阻抗为(在 $\omega L \gg R$ 的实际条件下)

$$Z = \frac{(R + j\omega L) \cdot \frac{1}{j\omega C}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \approx \frac{1}{\frac{CR}{L} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)} \quad (2.2.4)$$

变为导纳表示式

$$Y = \frac{1}{Z} = G + jB = \frac{CR}{L} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right) \quad (2.2.5)$$

并联谐振条件为

$$B = \omega_p C - \frac{1}{\omega_p L} = 0$$

谐振角频率为

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.2.6)$$

谐振阻抗为

$$Z_p = R_p = \frac{L}{CR} = \frac{\omega_p^2 L^2}{R} = Q_p \omega_p L = Q_p \frac{1}{\omega_p C} = \frac{1}{R\omega_p^2 C^2} \quad (2.2.7)$$

品质因数

$$Q = \frac{\omega_p L}{R} \quad (2.2.8)$$

由式(2.2.7)已知,在谐振时, Z_p 为纯电阻,且等于电感支路(或电容支路)

电抗的 Q_p 倍,因而此时并联谐振回路阻抗为最大值。而在偏离谐振点时,回路等效阻抗为感性(低于谐振频率时)或为容性(高于谐振频率时),如图 2.2.3 所示。

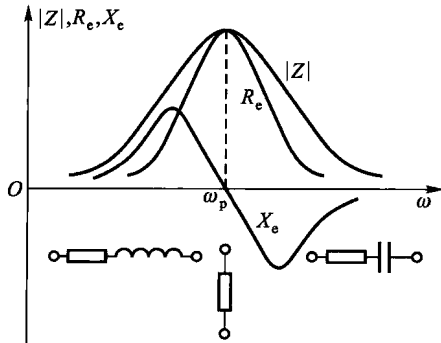


图 2.2.3 并联振荡回路等效阻抗与频率的关系

在谐振时,电感支路(或电容支路)的电流为电源电流 I_s 的 Q_p 倍,即

$$\dot{I}_{Lp} = jQ_p \dot{I}_s \quad (2.2.9)$$

$$\dot{I}_{Cp} = -jQ_p \dot{I}_s \quad (2.2.10)$$

因而并联谐振又称为电流谐振。

并联谐振回路的通频带与串联谐振回路通频带表示式相似,即

$$2\Delta f_{0.7} = \frac{f_p}{Q_p} \quad (2.2.11)$$

并联谐振回路适用于高内阻的信号源。从图 2.2.4 所示的信号源内阻对并联谐振曲线的影响即可看出。

必须注意,以上提到在谐振时,并联回路阻抗为最大值且为纯阻这一结论是在 $R \ll \omega L$ 的情况下获得的。如果 R 不能忽略,亦即回路 Q 值低,则并联谐振回路阻抗为最大和为纯阻这两点就不一定能够重合,视下列情况而定:

1) 如果电阻集中在电感支路,则调整电容使电路达到谐振,从而回路阻抗为纯阻和达到最大值这两点是重合的。若是通过改变电感来获得谐振,则这两点不能重合。

2) 如果电阻集中在电容支路,则改变电感来获得谐振,从而回路阻抗达到最大值且为纯阻这两点是重合的。若改变电容来获得谐振,则以上两点不能重合。

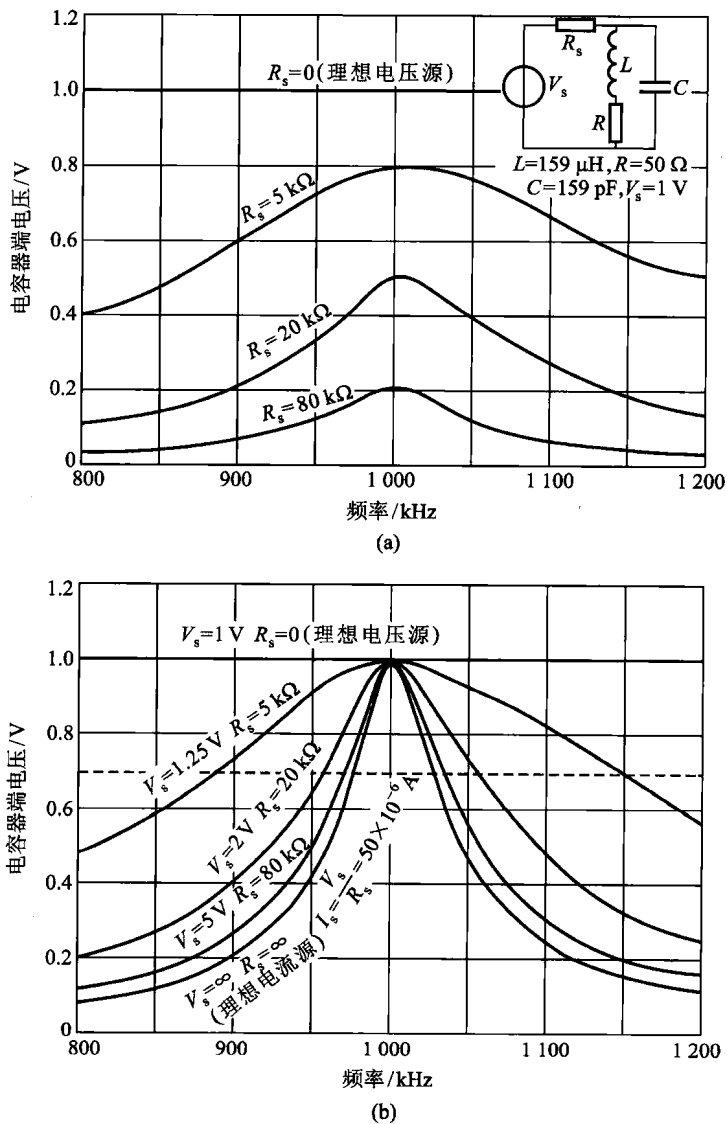


图 2.2.4 电源内阻对并联谐振曲线的影响

2.2.3 串、并联电路的阻抗互换与抽头电路的阻抗互换

图 2.2.5 所示的阻抗互换是指 A、B 两点的阻抗相等。这是经常应用的关系式：

$$R_s + jX_s = \frac{R_p(jX_p)}{R_p + jX_p} = \frac{X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} R_p + j \frac{R_p^2}{R_p^2 + X_p^2} X_p$$

由此得到

$$R_s = \frac{X_p^2}{R_p^2 + X_p^2} R_p = \frac{X_p^2}{Z_p^2} R_p \quad (2.2.12)$$

$$X_s = \frac{R_p^2}{R_p^2 + X_p^2} X_p = \frac{R_p^2}{Z_p^2} X_p \quad (2.2.13)$$

式中 $Z_p^2 = R_p^2 + X_p^2$ 。

反过来,用导纳公式

$$\frac{1}{R_s + jX_s} = \frac{R_p + jX_p}{R_p(jX_p)}$$

求得

$$R_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{R_s} = \frac{Z_s^2}{R_s} \quad (2.2.14)$$

$$X_p = \frac{R_s^2 + X_s^2}{X_s} = \frac{Z_s^2}{X_s} \quad (2.2.15)$$

式(2.2.12)与(2.2.13)是并联阻抗变换为串联阻抗的公式。式(2.2.14)与(2.2.15)则是串联阻抗变换为并联阻抗的公式,应牢记。

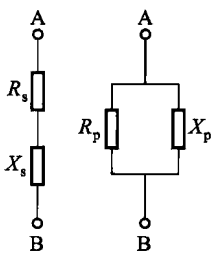


图 2.2.5 串、并联阻抗的等效互换

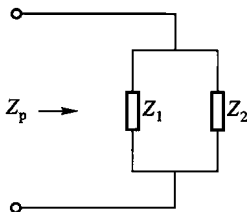


图 2.2.6 并联电路的广义形式

对于图 2.2.6 所示的并联电路广义形式,图中

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2$$

并假设 Z_1 与 Z_2 都满足实用条件: $X_1 \gg R_1$ 与 $X_2 \gg R_2$, 则在谐振时, $X_1 + X_2 = 0$, 回路的谐振阻抗为

$$Z_p = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2)}{(R_1 + jX_1) + (R_2 + jX_2)} = \frac{(R_1 + jX_1)(R_2 + jX_2)}{R_1 + R_2}$$

再利用 $X_1 \gg R_1$ 、 $X_2 \gg R_2$ 的关系, 上式变为

$$Z_p \approx -\frac{X_1 X_2}{R_1 + R_2} \quad (2.2.16)$$

代入谐振条件 $X_1 = -X_2$, 上式可写成

$$Z_p = \frac{X_1^2}{R_1 + R_2} = \frac{X_2^2}{R_1 + R_2} \quad (2.2.17)$$

将上式与式(2.2.7)相比较, 可知二者的形式是完全相似的。式(2.2.17)可以用来推演其他形式的并联谐振回路特性。例如图 2.2.7 是两个支路都有电阻的情形。由式(2.2.17)即可得出在谐振时的回路阻抗等于

$$Z_p = \frac{(\omega_p L)^2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{(R_1 + R_2)(\omega_p C)^2} \quad (2.2.18)$$

与式(2.2.7)相比较可知, 如果 R_1 和 R_2 都不很大, 则可以认为 R_1 和 R_2 都是集中在电感支路内的, 这时回路的 $Q_p = \omega_p L / (R_1 + R_2)$ 。这一观念相当重要, 实际中有时很有用。

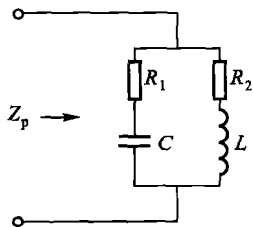


图 2.2.7 两个支路都有电阻的并联回路

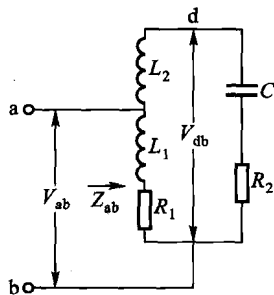


图 2.2.8 电感抽头式并联谐振回路

图 2.2.8 是一种常用的电感抽头式并联谐振回路。由式(2.2.17)可得

$$Z_{ab} = \frac{X_1^2}{R_1 + R_2} = \frac{(\omega_p L_1)^2}{R_1 + R_2} \quad (2.2.19)$$

如果令

$$p = \frac{L_1}{L_1 + L_2} = \frac{L_1}{L} \quad (L = L_1 + L_2) \quad (2.2.20)$$

代入式(2.2.19)即得

$$Z_{ab} = \frac{(\omega_p L)^2}{R_1 + R_2} p^2 = p^2 Z_{db} \quad (2.2.21)$$

式中 Z_{db} 为 db 两端的谐振阻抗。因此式(2.2.21)表示, 改变 p 值, 即可改变 ab 两端的等效阻抗值。由图 2.2.8 可知

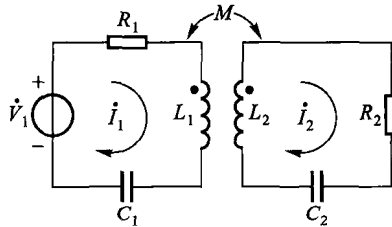
$$p = \frac{L_1}{L_1 + L_2} = \frac{V_{ab}}{V_{db}} \quad (2.2.22)$$

称为接入系数。

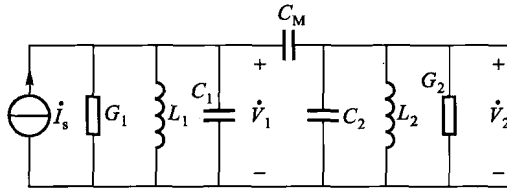
2.2.4 耦合回路

图 2.2.9 所示为两种常用的耦合回路。由于它们的初、次级都是谐振电路，因而也称为耦合振荡回路。以图 2.2.9(a) 为例，表示两个回路之间耦合程度的系数 k 称为耦合系数，即

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2.2.23)$$



(a) 互感耦合串联型回路



(b) 电容耦合并联型回路

图 2.2.9 两种常用的耦合回路

首先研究耦合回路的阻抗特性。仍以图 2.2.9(a) 为例，将其绘成一般形式的耦合回路，如图 2.2.10 所示。图中 $Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} = R_1 - jX_{C1}$ ， $Z_2 = R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} = R_2 - jX_{C2}$ 。

由基尔霍夫定律 (Kirchhoff's law) 得出图 2.2.10 的回路电压方程为

$$\dot{V}_1 = \dot{I}_1 (Z_1 + j\omega L_1) - \dot{I}_2 (j\omega M) = \dot{I}_1 Z_{11} - j\omega M \dot{I}_2 \quad (2.2.24)$$

$$0 = \dot{I}_2 (Z_2 + j\omega L_2) - \dot{I}_1 (j\omega M) = \dot{I}_2 Z_{22} - j\omega M \dot{I}_1 \quad (2.2.25)$$

式中， $Z_{11} = Z_1 + j\omega L_1 = R_{11} + jX_{11}$ ，为初级回路的自阻抗； $Z_{22} = Z_2 + j\omega L_2 = R_{22} + jX_{22}$ ，为次级回路的自阻抗。