



实用无线电 设计

■ 袁 杰 编著 ■ 张友德 张 凌 改编

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

实用无线电设计

袁 杰 编著

张友德 张 凌 改编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以无线电系统相关电路设计实务为主,内容全面、系统,多以简要的设计公式及引用可行的近似经验公式为主,尽量避开烦冗的理论分析、演算及设计。内容包括:无线电设计基础、谐振电路及阻抗匹配设计、滤波器设计、信号调制、放大器设计、混频器设计、辅助电路设计,等等。内容浅显易懂,逐章列出其设计重点及程序。

本书可供大学相关专业“无线电通信”课程使用,也适用于在职或无线电设计人员及电子通信工程的学习者参考。

本书中文简体字版由台湾全华科技图书股份有限公司独家授权,仅限于中国大陆地区出版发行,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字:01-2005-1639

图书在版编目(CIP)数据

实用无线电设计/袁杰编著;张友德,张凌改编. —北京:电子工业出版社,2006.6
ISBN 7-121-02714-3

I. 实… II. ①袁… ②张… ③张… III. 无线电通信—通信系统—设计 IV. TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第056876号

责任编辑:张 榕(zr@phei.com.cn)

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:29.25 字数:656千字

印 次:2006年6月第1次印刷

印 数:5000册 定价:45.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

《实用无线电设计》一书的编写目的，在于提供实用的无线电高频电路或系统的设计。本书适用于在职或业余无线电工程设计人员，以及电子通信工程的学习者，可用做相关电路设计时的参考。为求适合于实际应用，全书在参考相关资料并加以整理后，多以简明的设计公式，并引用可行的近似经验公式为主，尽量避免烦冗的理论分析、演算或设计。

全书共计 12 章，内容涵盖无线电通信系统的组成单元，被动及主动元件的高频特性，谐振电路及阻抗匹配设计，滤波器设计，信号调制，放大器设计，低噪声、宽频带及功率放大器设计，正弦波振荡器设计，频率合成器设计，混频器设计，辅助电路设计，发射机设计及接收机设计等，逐章列出其设计重点及程序。另有附录 A 补充说明变容二极管的特性，并加上应用案例，列出变容二极管谐振器的设计程序。附录 B 为与噪声相关的定义与计算，这是在无线电高频电路设计及系统设计时，必须加以关注的重点之一。

《实用无线电设计》一书承蒙全华图书编印出版，谨此致谢。

同时，并以本书献给内人 W.B.Fang，以及儿子 Ning 和 Ling 及他们的家人，感谢他们长期以来的耐心和支持。

袁 杰

当前无线电技术的应用已渗透到社会的各个方面，但许多电子工程、通信工程专业的学生普遍感到学习一些基础课后不太清楚如何应用理论于设计，还有一些电路设计人员希望掌握的专业知识更系统完整。为了满足广大读者的需要，我们引进了本书。该书对无线电系统相关电路设计的介绍既全面又精练，很有参考价值。特点在于提供了实用的无线电高频电路和系统设计程序，为求实用，尽量避免复杂的理论分析和公式推导，直接提出简要公式和近似经验公式。

本书内容涵盖组成无线电通信系统的各组成单元，包括：滤波器设计、信号调变、放大器设计、混频器设计、辅助电路设计，以及发射接收机设计等，并逐章列出设计重点及步骤。适合电子电路设计人员、学习电子通信工程的学生及无线电爱好者阅读、参考。

在改编过程中做了以下工作：

1. 对不符合国内读者习惯的字、词及专业术语，做了适当修改。
2. 对不适合修改的专业术语等在第一次出现时给出英文原文词或中文注释，以方便读者理解。
3. 对原书中的漏字、多余字、错字及个别错误等做了修改。
4. 对技术术语、名词、图形符号及计量单位等，按国内要求进行了统一。

改 编 者

第1章 无线电设计基础	1
1.1 被动元件的高频特性	1
1.2 微带	7
1.3 传输线	15
1.4 二极管	16
1.5 三极管	21
1.6 S 参数	28
1.7 史密斯图	31
习题	37
第2章 谐振电路及阻抗匹配设计	41
2.1 谐振电路	41
2.2 谐振电路的耦合	47
2.3 阻抗匹配网络设计	50
2.4 应用史密斯图的匹配网络设计	55
2.5 集总型元件设计	58
习题	66
第3章 滤波器设计	68
3.1 滤波器的分类	68
3.2 滤波器的特性参数	70
3.3 滤波器设计-映像参数	73
3.4 滤波器设计-现代网络理论	78
3.5 分布型滤波器	97

3.6	石英晶体滤波器	104
3.7	声表面波滤波器	108
3.8	主动滤波器	110
3.9	单向双讯滤波器	113
	习题	114

第4章 信号调制 116

4.1	振幅调制	116
4.2	频率调制	120
4.3	单边带调制	125
4.4	数字调制	128
4.5	数字信号与功率	133
4.6	数字调制的应用与设计	136
4.7	数字信号的测量	142
	习题	151

第5章 放大器设计 153

5.1	放大器的电路形式	153
5.2	放大器的失真与噪声	156
5.3	小信号放大器偏压设计	159
5.4	S 参数与放大器设计	168
5.5	并存共轭匹配放大器设计——双向性, $K > 1$	173
5.6	双向性定值增益放大器设计	178
5.7	单向性定值增益放大器设计—— $K > 1$	183
5.8	定值增益放大器设计——潜在性不稳定 $K < 1$	188
5.9	MMIC 的应用	193
5.10	放大器的交连与去交连	195
5.11	放大器的电路安排	196
	习题	197

第6章 低噪声、宽频带及功率放大器设计 201

6.1	低噪声放大器设计	201
-----	----------	-----

100	6.2 定值噪声度圆与低噪声放大器	206
100	6.3 宽频放大器设计——应用补偿性匹配	212
100	6.4 宽频放大器设计——应用负反馈网络	221
100	6.5 高功率放大器设计——应用大信号反射系数 Γ_{sp} 及 Γ_{LP}	223
100	6.6 高功率放大器设计——应用大信号阻抗	230
100	习题	240

第7章 正弦波振荡器设计 243

100	7.1 振荡准则与规格	243
100	7.2 振荡器的反馈分析	245
100	7.3 负电阻振荡器	246
100	7.4 振荡器设计技术	248
100	7.5 BJT LC 振荡器设计	250
100	7.6 BJT 电压调控振荡器设计	253
100	7.7 JFET VCO/LC 振荡器设计	254
100	7.8 LC 振荡器的输出交连与功率	256
100	7.9 VCO/LC 振荡器的特性参数及测试	258
100	7.10 晶体振荡器	259
100	7.11 晶体振荡器的模式	261
100	7.12 晶体振荡器设计（一）	263
100	7.13 晶体振荡器设计（二）	264
100	7.14 晶体振荡器的测试	265
100	习题	266

第8章 频率合成器设计 269

100	8.1 锁相环路	269
100	8.2 锁相环路设计	274
100	8.3 间接式频率合成器	277
100	8.4 分频器设计	279
100	8.5 复合环路频率合成器设计	284
100	8.6 分数式 N 环路的频率合成器	287
100	8.7 直接数字式频率合成器	290

8.8	频率合成器设计	294
8.9	相位噪声	296
	习题	298

第9章 混频器设计 301

9.1	混频器设计原理	301
9.2	混频器的特性参数	304
9.3	混频器的类型	306
9.4	被动式混频器	308
9.5	被动式混频器设计	310
9.6	主动式混频器	311
9.7	主动式混频器设计	314
9.8	混频器的应用	318

第10章 辅助电路设计 320

10.1	高频电子开关	320
10.2	衰减器	324
10.3	平衡-非平衡变压器	326
10.4	自动增益控制	329
10.5	可变增益放大器	332
10.6	倍频器设计	335
10.7	信号功率分配器/组合器设计	339

第11章 发射机设计 343

11.1	发射机的基本架构	343
11.2	发射机的功能特性及参数	345
11.3	连续波 CW 发射机设计	349
11.4	调频发射机设计	351
11.5	调幅 (AM) 发射机设计	354
11.6	单边带 (SSB) 发射机	356
11.7	线性放大链串设计	359
11.8	发射机设计	361

习题	364
----	-----

第12章 接收机设计 368

12.1 超外差接收机	368
12.2 直接转换接收机	373
12.3 接收机的频率计划	374
12.4 接收机的功能规格	381
12.5 接收机的增益配置及噪声度计算	382
12.6 灵敏度与最小可辨识信号	384
12.7 互调失真与第三阶交截点	385
12.8 接收机前端设计	391
12.9 中频放大器设计	397
12.10 接收机设计(一)	398
12.11 接收机设计(二)	403
习题	413

附录A 变容二极管的特性与应用 416

A.1 变容二极管的工作原理	416
A.2 调谐比值与元件 Q 值	419
A.3 温度效应与补偿	423
A.4 电源供应	426
A.5 电子调谐电路设计	427

附录B 噪声与信号对噪声比 435

B.1 有效噪声频宽	435
B.2 噪声因素 F 与噪声度 NF	436
B.3 串级电路的噪声度	439
B.4 噪声温度	440
B.5 转换噪声	442
B.6 噪声测量技术	445
B.7 调幅 AM 的信号对噪声比	447
B.8 调频 FM 的载波对噪声比	448

B.9	调相 PM 的输出信号对噪声比	450
B.10	位元能量对噪声频谱密度比 $\frac{E_b}{N_0}$ —— 数字系统的信号对噪声比	451

附录 C 参考资料 453

15.1	.....	15.1
15.2	.....	15.2
15.3	.....	15.3
15.4	.....	15.4
15.5	.....	15.5
15.6	.....	15.6
15.7	.....	15.7
15.8	.....	15.8
15.9	.....	15.9
15.10	.....	15.10
15.11	.....	15.11
15.12	.....	15.12

附录 D 变量二阶微分方程 454

A.1	.....	A.1
A.2	.....	A.2
A.3	.....	A.3
A.4	.....	A.4
A.5	.....	A.5

附录 E 噪声功率谱密度 455

B.1	.....	B.1
B.2	.....	B.2
B.3	.....	B.3
B.4	.....	B.4
B.5	.....	B.5
B.6	.....	B.6
B.7	.....	B.7
B.8	.....	B.8

第1章

无线电设计基础

一个无线电系统的组成，基本上不外乎是应用一些被动元件（没有放大能力的元件），半导体的主动元件（具有放大能力的元件），以及传递信号的传输线，等等。只有在无线电系统的高频电路中，所需元器件各有其频率上的极限，或是应用上的限制。对无线电设计者而言，若能充分了解并掌握其频率响应等特性，会有助于设计工作的顺利进行。同时，在设计所需的工具中，对史密斯图的熟练应用，也是不可或缺的。

本章将就电阻、电感及电容，半导体器件，以及传输线等的特性及应用，略为介绍。同时再就 S -参数的定义、史密斯图的结构及应用，提供扼要的复习。

1.1 被动元件的高频特性

在高频信号下，集总型的电阻、电感及电容等，所呈现的频率响应，都有异于低频信号时，将不再显现出单纯的电阻、电感或电容特性。即使是一根简单的导线，也会有其高频的多样性。

1. 导线

用于电子电路的导线，多为铜质并在表面镀以锡或银的软线，使其易于焊接及导电。一般常用者多属单股导线，也有多股绞合而成，以增强其可挠性。为使导线之间相互隔绝，在表面再加一层绝缘涂层，一般称之为漆包线。

导线在高频时的集肤效应（Skin Effect），即高频信号在导线内流通时，由于导线内

部磁场的作用，将电子挤向导体的表面，使得导线的中心部分，不再是一个有用的导体，且因电流集中在有限的导体表面，致使其在高频信号时的电阻（又称为交流电阻（AC Resistance）随之增加。同时，由于信号频率的升高，使得导线的杂散电感所呈现的电感抗，也会随之升高而显现其效应，一根导线的电感 L ，可用下列公式计算

$$L = 2.0 l \left[2.303 \lg \left(\frac{4l}{d} - 0.75 \right) \right]$$

式中， L ——导线的杂散电感，单位 nH；

l ——导线长度，单位 cm；

d ——导线截面直径，单位 cm。

如图 1.1-1 (a)、(b) 所示，为导线的高频等效电路及阻抗的频率响应曲线。

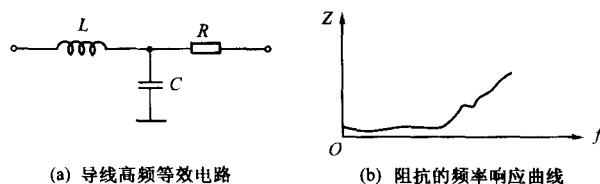


图 1.1-1 导线的高频等效电路及阻抗的频率响应曲线

2. 电阻

如图 1.1-2 (a) 及 (b) 所示，为电阻的高频等效电路及电抗的频率响应曲线，说明一个电阻在高频信号时，同样会呈现分布电容与引线电感的效应。这一分布电容 C 一直有效地与电阻 R 并联而存，可对信号形成旁路，因而将使电阻的标示值，随频率上升而下降。如图 1.1-3 所示，电阻中分布电容的效应不仅因频率的上升而使电阻值降低，而且，如果电阻的结构不属于高频应用类型，或者不属于薄膜型号，即使在较低的微波频段时，高值电阻的阻值下降比低值者更甚。至于与电阻串接的引线电感 L ，在表面粘着元件（Surface Mount Device, SMD）的电阻中，高频效应甚低，因而其阻抗对维持电阻的标示值影响有限。

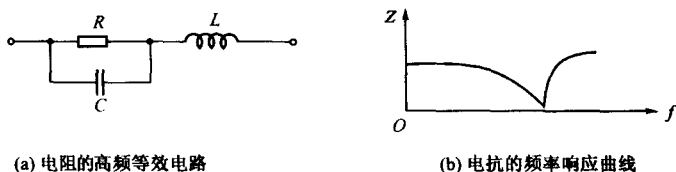


图 1.1-2 电阻的高频等效电路及电抗的频率响应曲线

以薄膜技术制作的晶片电阻（Chip Resistance），都以氧化铝（Alumina）等为基材，一般的频率响应甚佳，从直流到 2GHz 的频段内，这类电阻的寄生电抗所产生的效

应很低，常可略而不计。

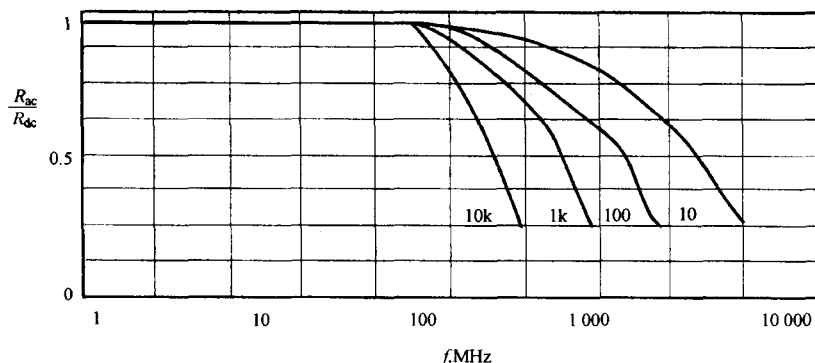
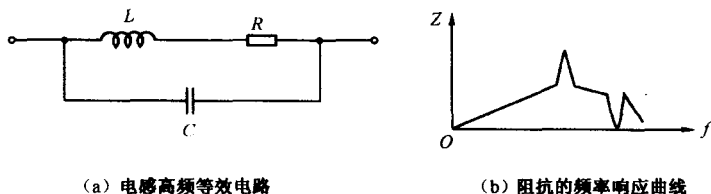


图 1.1-3 交流电阻 R_{ac} /直流电阻 R_{dc} 的频率响应曲线

3. 电感

电感的结构十分简单，只是将一根导线绕成螺圈状，多以线圈（Coils）称之，目的在于增加线圈各匝间的磁通链，以增加导线的电感量，但在实际线圈的结构上，由于线圈各匝之间存在分布电容，因而形成一个与电感并联的电容。同样，一根导线本身存在的电阻，在高频信号通过时，其效应将会更显著。如图 1.1-4（a）及（b）所示，为电感的等效电路及阻抗的频率响应曲线。由图 1.1-4（a）可知，由于 L 、 C 及 R 的组合，在频率响应上，其间必将会有一个频率，可使线圈电感 L 与分布电容 C 形成并联谐振，而产生很高的阻抗。实际上，这一高值阻抗，若非受到线圈上低值电阻 R 的限制，将为一无限大值。使线圈形成谐振的频率，称为电感线圈的自发谐振频率（Self Resonance Frequency, SRF），这是电感性能的一个重要参数，在设计 LC 谐振电路时，电感的 SRF 值必定要远高于电路的信号频率。



(a) 电感高频等效电路

(b) 阻抗的频率响应曲线

图 1.1-4 电感高频等效电路及阻抗的频率响应曲线

当设计制作高频线圈时，为了降低分布电容，而有较高的 SRF 值，线圈长度 l 与线圈直径 d 的比值，应求其小，这一比值称为线架因数（Form Factor），一般的要求为

$$l/d \approx 1 \text{ 实际应用者都为 } l/d < 1.5 \sim 2.0$$

不过这一设计限制，常会使可取得的最大电感量降低，为补偿这一缺失，通常可在线圈中，置入适当铁磁材质的磁芯（Magnetic Core），以增加其电感量。

当以电应用于调谐电路时，另有一个必须注意的重要参数，就是电感的品质因素（Quality Factor） Q 。品质因素 Q 的定义，说明某一电感在某一信号频率测试下的品质状态。线圈 Q 值是其电阻抗与线圈总耗损的等效电阻的比值，所称的耗损来自直流串接电阻、磁芯耗损及集肤效应。 Q 值会随频率而变，在较低的信号频率时， Q 值会随频率上升而提升，只有当频率再高时， Q 值将因导线集肤效应的电阻上升，而随之下降。除此之外，会因分布电容的效应，将使电感特性改变。当信号频率为自发频率 SRF 时， Q

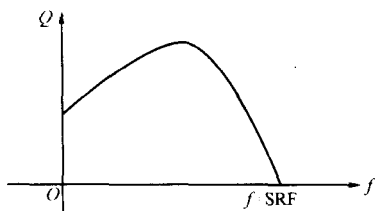


图 1.1-5 Q 值的频率响应

值即降为零。 Q 值的频率响应如图 1.1-5 所示。线圈的直流串接电阻，由于其为导线本身的电阻，不仅会影响线圈 Q 值，且在小型高频信号的高值电感中，常有很高的数值，因而对直流偏压会产生相当的压降，这一现象在需要稳定偏压的元件上，将会造成不良后果，而使电路的运作不正常，因而如何选择适当的高频电感，是设计实务上重要课题之一。

前曾述及导线的集肤效应，会在导线上形成交流电阻，而集肤效应的计算仅能有效地应用于平直导线。而以导线绕制而成的线圈，会有更多的磁场效应，使得导线的交流电阻更大，这一现象称为接近效应（Proximity Effect）。接近效应并不容易估测，但却不容忽视。一般而言，以导线绕成线圈后，因接近效应而增加的电阻，约为集肤效应的 2~10 倍。通常，为求降低接近效应的影响，电感线圈各匝间的间距，不宜太靠近，一般可用导线直径作为间距参考。

同时，在高频信号时，所用高值电感量线圈的耗损问题也很重要。高频耗损除了电阻耗损外，主要来自线架（磁芯）的磁滞、涡流及介质等的耗损。一般而言，在无线电高频电路中常用的电感线圈，都以空气芯（Air Core）形式的为佳。

4. 空气芯线圈设计

在进行无线电路设计时，有时会遇到一些特定数值或形式的线圈，尤其是用在需求量不大，或是可行性试验的计划上，因而常需自行设计及制作。

高频电路最常用到的单层空气芯线圈，可按下列公式计算所需的线圈匝数。

$$n = \frac{\sqrt{L(24r + 25l)}}{r}$$

式中， n ——线圈匝数；

L ——所需电感量，单位 μH ；

l ——线圈长度, 单位 cm;

r ——线圈内半径, 单位 cm。

依据上述设计公式所制作的线圈, 所得电感量的精确度, 仅在线圈长度 l 与其半径 r 约为相等时为最佳, 但在信号频率高至 VHF 以上时, 精确度也会受到影响。同时, 用以制作线圈的导线, 最好选用漆包线, 以避免各线匝之间因接触而短路。所需导线的型号 (粗细), 可由线圈长度 l 与匝数 n 来决定。

5. 环形线圈设计

环形线圈 (Toroids) 是一种体型小巧, 但具有高电感量的线圈, 是以圈饼形的环状磁芯为线圈架, 外加导线绕制而制成的。磁芯材质可以是铁粉芯 (Powdered Iron Core) 或铁酸盐芯 (Ferrite Core), 应用的信号频率可由 1kHz~1GHz, 两者在无线电高频电路的应用上, 并无明确的分界, 若两者的磁导系数 μ 值与型号相同时, 则在电路上的表现差异不大。只有在特定需求下, 两者之一将会较另一个为优。

一般而言, 若两者的型号尺寸相同时, 铁粉芯所能承受的高频功率, 常比铁酸盐芯的高, 因而不易导致信号失真, 或使本身烧毁。铁酸盐芯在强力高频功率下, 会有成为永久磁铁的倾向, 因而将使其 μ 值从此改变。对铁粉芯而言, 即使高频功率过强, 在功率除去后, 仍能维持原来的 μ 值。由此可得出结论, 即应用于高频功率电路时, 以铁粉芯的磁芯为佳。

环形线圈由于有一个封闭的环状磁路, 因而磁通泄漏甚低, 不致在线路之间产生不当的耦合, 不像应用空气芯线圈时, 常需加以屏蔽, 以阻绝不当的高频耦合, 所以是一个很具应用价值的元件。

铁磁材质的环形线圈的设计, 需有一个由厂商提供的参数 A_L , 一般都列在磁芯的特性数据资料中, 若为铁粉芯, A_L 是指每绕 100 匝, 所能取得的电感量, 单位 μH 。若为铁酸盐, 则是指每绕 1000 匝时的值, 单位 mH 。磁芯型号大小的选择, 以整圈恰能绕满计算所得的匝数者为宜。

铁粉芯环形线圈匝数

$$n = 100 \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

式中, n ——电感量为 L 时, 单层所需的匝数;

L ——所求的电感量, 单位 μH ;

A_L ——铁粉芯特性参数, 单位 $\mu\text{H}/100$ 匝。

铁酸盐芯环形线圈匝数

$$n = 1000 \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

式中, n ——电感量为 L 时, 单层所需的匝数;

L ——所求的电感量, 单位 mH ;

A_L ——铁酸盐芯特性参数, 单位 $\text{mH}/1000$ 匝。

绕制线圈时, 需注意以下事项:

(1) A_L 值的误差一般为 $\pm 5\% \sim \pm 8\%$ 。

(2) 加在磁芯的直流或交流功率, 应以不使其形成饱和为宜。

(3) 单层环形线圈的绕制, 如图 1.1-6 所示。图 1.1-6 (a) 为正确的绕法, 可使各匝间的分布电容减至最小, 以提升电感本身的谐振频率, 而扩展其应用的频率范围。如图 1.1-6 (b) 所示, 为不正确的绕法, 将会增加各匝间的分布电容, 以及引线端的电容量。

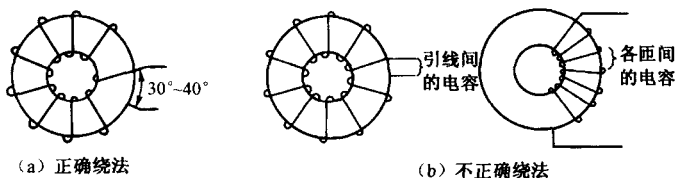


图 1.1-6 环形线圈的绕制

6. 电容

在选择用于高频 (RF) 或微波频段的电容器时, 不仅要着眼于其价格及温度稳定性, 更要考虑其在高频时的工作特性。如图 1.1-7 (a) 所示, 为电容器在高频时的等效电路, 而电容器上的引线电感, 在信号频率增加时, 将会改变电容的特性, 尤其是当电容与引线电感形成串联谐振时, 将使其总电抗为零。如图 1.1-7 (b) 所示为电容器阻抗的频率响应曲线。只有在信号频率高于其串联谐振频率后, 电容器的特性才成为电感性的, 因而在设计电路时, 信号频率应低于其串联谐振频率。电容值越大, 串联谐振频率越低, 将使电容器更易趋于电感性, 因而高值电容较之低电容值的, 更易成为电感性。电容器用于耦合或接地旁路时, 对信号频率所呈现的电容阻抗, 宜取用较大者, 如电容阻抗为 5Ω 者, 较之 0.1Ω 者为佳, 一般可取 1Ω 左右。

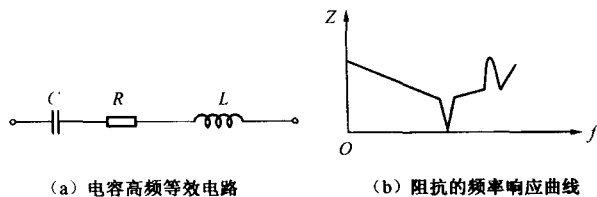


图 1.1-7 电容高频等效电路及阻抗的频率响应曲线

以下是几种常用于无线电系统的电容器: