

TURING

图灵电子与电气工程丛书

ELSEVIER
爱思唯尔

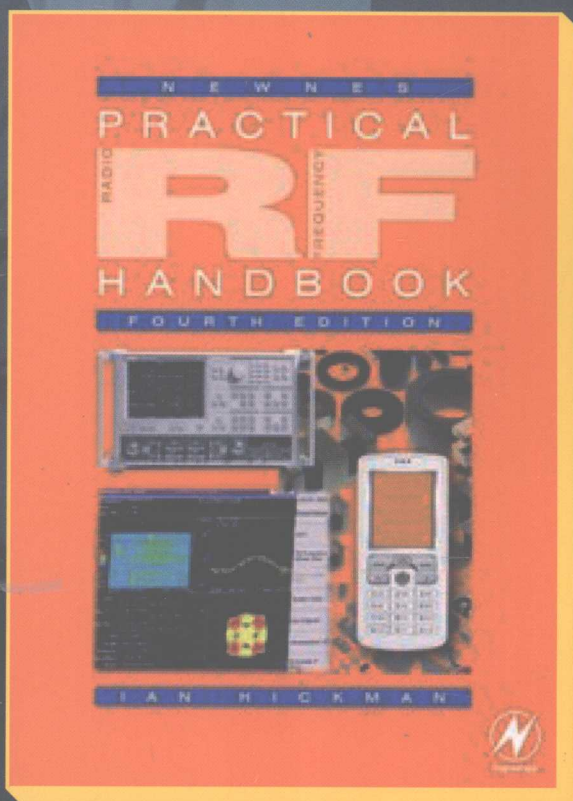
(第4版)

实用射频技术手册

Practical Radio-Frequency Handbook

Fourth Edition

[英] Ian Hickman 著
张弘 华伟 陈倩 等译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TURING

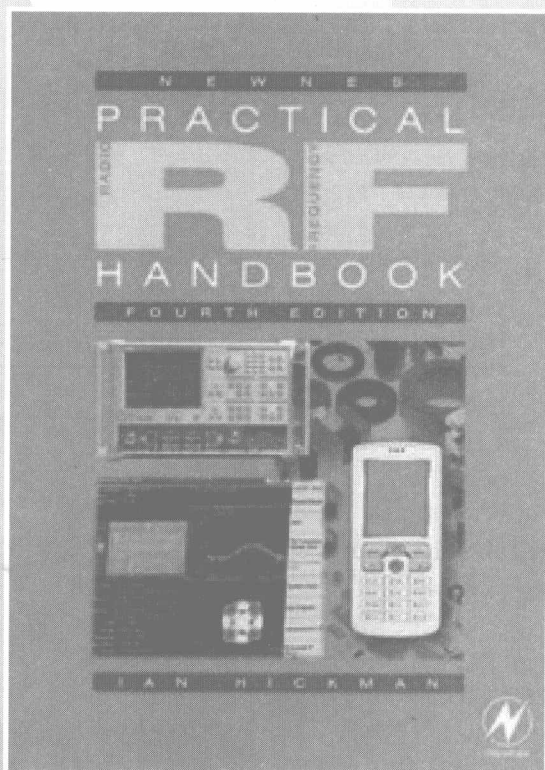
图灵电子与电气工程丛书

(第4版)

实用射频技术手册

Practical Radio-Frequency Handbook
Fourth Edition

[英] Ian Hickman 著
张弘 华伟 陈倩 等译



人民邮电出版社
北京

人民邮电出版社

样书

专用章

图书在版编目 (CIP) 数据

实用射频技术手册: 第4版/ (英) 希克曼 (Hickman, I.) 著; 张弘等译. —北京: 人民邮电出版社, 2009.7
(图灵电子与电气工程丛书)

书名原文: Practical Radio-Frequency Handbook, 4E
ISBN 978-7-115-20791-3

I. 实… II. ①希… ②张… III. 射频电路—技术手册
IV. TN710-62

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第071213号

内 容 提 要

射频技术在无线应用系统中占有重要地位。本书从实际出发, 全面介绍了射频技术, 并涵盖了最新发展, 涉及内容包括器件、电路、设备、系统、天线、无线电波传播、外部噪声和测量等。

本书是从事射频设计工作工程师的必备实用手册, 也为业余无线电爱好者、电子爱好者和对射频通信电子感兴趣的人员提供帮助。

图灵电子与电气工程丛书

实用射频技术手册

-
- ◆ 著 [英] Ian Hickman
 - 译 张 弘 华 伟 陈 倩 等
 - 责任编辑 朱 巍
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
 - 邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 15.75
 - 字数: 408千字 2009年7月第1版
 - 印数: 1-3 000册 2009年7月北京第1次印刷
 - 著作权合同登记号 图字: 01-2007-4266号

ISBN 978-7-115-20791-3/TN

定价: 45.00 元

读者服务热线: (010) 51095186 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

版 权 声 明

Practical Radio-Frequency Handbook by Ian Hickman, ISBN: 0-7506-8039-3.

Copyright © 1993, 1997, 2002, 2007, Ian Hickman. Published by Elsevier Ltd.

All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-259-814-1.

Copyright © 2009 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House I

Singapore 239519

Tel: (65)6349-0200

Fax: (65)6733-1817

First Published 2009

2009年初版

Printed in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由Elsevier (Singapore) Pte Ltd.授权人民邮电出版社出版。本版仅限在中华人民共和国(不包括香港特别行政区和台湾地区)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

致 谢

我的同事 C.W. (千万别写错了) 为本书第 10 章做了大量工作, 在此表示感谢。同时要感谢 M.H.G. 审读并对第 13 章提出了许多宝贵的修改意见。

在此, 还要感谢以下为本书提供了插图版权或引述文字版权的单位:

Anritsu 欧洲公司

安捷伦科技公司

Boonton.

Epcos 公司

Freescale 半导体公司

英国工程与技术研究所

IEEE

国际电信联盟

MMG Mag DEV 公司

Penton Media 公司

飞利浦英国公司

Racal 天线公司

Radiometrix 公司

RFI Shielding 公司

Roke Manor 研究公司

Schaffner 公司

索尼-爱立信移动通信公司

Taoglass 公司

Tektronix 公司

Thurlby Thandar 仪器公司

Times 微波系统公司

Willtek 公司

前 言

书如其名，实用射频技术手册就是要成为一本有用的手册和指南，为所有希望熟悉射频技术的人提供帮助。希望本书对那些想要进入射频设计领域或者最近正在从事射频设计的电子工程师有用，并惠及其他工程师、技术员、无线电业余爱好者、电子爱好者和对射频通信电子技术感兴趣的人。因此，本书并未写成一本教科书。书中没有满篇的公式推导，尽管这样做再容易不过了，读者若需要这些公式推导可以查阅其他书籍。本书在需要的地方会用简单的形式给出公式，目的在于使用，而不做推导。

自然，本书全力关注当前的技术发展，但会在适当的地方提及早期的技术发展作为背景知识，试图在有限的篇幅内仍能为书增添一些趣味和色彩。本书涉及的范围很宽（包括器件、电路、设备、系统、无线电波传播和外部噪声），由于篇幅有限，不得不大大地缩简最初计划的一些内容。为了帮助读者了解更多的信息，多数章末列出了有用的参考资料，可供进一步查阅。书中对早期技术发展的描述并不是浪费宝贵的篇幅，这些描述除了增加趣味性以外，提到的一些早期技术会时时再现，尤其是在当前打破常规的风气下。一个很好的例子就是超再生接收机。它早在第二次世界大战前许多年就已经出现了，并在战争中提供了高质量的服务。这种技术曾经盛极一时，后来却被抛弃了，现在又出现在对价格非常敏感的短距离设备中，如车库门遥控器和中控锁控制器。

当前，好的射频工程师非常少，我觉得这种情况会一直持续下去。造成这种现象的部分原因是，至少在大专院校开设的课程中还缺乏这些内容。笼统地教授数字技术课程显然要简单容易得多，而且，由于技术的迅速发展，数字技术还具有长期迷人的商业前景。然而，现实的世界却是模拟技术的世界，信息通信无论是模拟形式还是数字形式，在远距离无线通信中都需要利用电磁辐射。电磁辐射的频率可能是射频、微波、毫米波或光波，每一种都对应一整套技术。本书涉及射频部分，在早期其频率范围取至 1000MHz。传统上，将工作在这个频率以上的技术人员称为微波工程师（有时，又很不公正地将他们称为“管道工”），包括波导、谐振腔等。但是，随着近年来技术的巨大进步，尤其是小型化表面组装元件和高频晶体管的发展，传统的用于甚高频和超高频的印制电路技术已经扩展到了 1.5GHz（如 SOLAS 海上救生、GPS 全球定位系统和 Glonass 全球卫星导航系统），2GHz（如针对移动电话的 PCS 和 DCS）甚至 2GHz 以上（如蓝牙和用于工业、科学和医学频段的 2.54GHz 短距离无线数据链接的其他技术）。在这个背景下，一个有趣的重大发展是射频设计的应用领域发生了巨大变化，由电路设计组（如移动电话制造商的实验室）扩展到集成电路制造商的开发设备。于是专用集成电路（ASIC）不再限于数字电路领域，ADI、Maxim、飞利浦等公司正在不断地推广一系列新产品，为移动电话和相应的基站集成了越来越多的接收/发射前端。对 900MHz 和 1800MHz（GSM 和 DCS）频段都适用的双频集成电路已经出现，目前到了 3G 设备——第三代移动电话。也大量出现了必需的非匹配元件，如声表面波和体声波（SAW 和 BAW）滤波器，这些滤波器由 EPCOS（前身是西门子/松下公司）、富士通、村田等公司制造。

近年来，由于技术的发展，各种各样的服务中用到的频率范围从几千赫兹一直到 6GHz，

这些服务包括语音广播和电视，各种商业的、专用的、政府的和军用的通信，遥感和遥控、无线电电报和传真以及业余无线电。同时还有一些特殊的应用，如日益增加的短距离通信和控制（如无线麦克风、车库门遥控器）。射频技术也进入了非无线应用领域，如宽带电缆调制解调器（cable modem），以及时钟频率到吉赫兹范围采用 FDDI（光纤数字数据交换）标准的光纤数据传输。还有许多特殊的应用，如 ESM（电子支援系统，如窃听）、ECM（电子对抗系统，如探测和干扰）以及 ECCM（也叫电子反对抗系统，如采用跳频或直接序列扩频技术的抗干扰无线电收发装置）。实际上，频谱资源有限的压力从未像今天这样大，具有射频知识的人们不得不在拥挤的频谱环境中设计、生产、维修和使用设备。希望本书对投身于这些工作的人有用。

同时需要注意，虽然书中有些电路显示了元件值，但这不是一本现成的、拿来就用的射频电路手册，而是介绍射频电路和设备的一般设计和工作原理及技术的书。

第 4 版对全书做了增删和修正，第 3 章和第 12 章充实了大量新的内容。而最主要的变化是新增加了第 11 章，涉及先进的结构，包括超外差接收机中的中频（IF）信号处理技术以及其他有关主题。

同样重要的是更新了附录 13，介绍了频率分配的详细情况。其中，附注 1 给出了英国的频率分配情况，详细内容和更多信息可以根据给出的网址获得；附注 2 简要给出了美国频率分配的情况。附录 14 给出了与低功率、短距离无线电装置有关的信息，展现了一个近年来由于各种原因而呈爆炸式增长的领域。首先，许多装置不需要许可证，但制造商必须确保这些装置要满足适当的技术规范，这极大地方便了终端用户；其次，由于频率范围很有限，因此频率几乎可以不受限制地重复利用，但在广播应用甚至 PMR（专用移动无线电）中是不可能的。有关的技术规范的详情可以查阅附录 14。

希望第 4 版对内容的增加和修改将使本书对于所有对射频技术感兴趣的人更加实用。工作在这个领域的专业人士包括集成电路设计者、电路和微型组件工程师、设备工程师和系统工程师。集成电路设计是一个非常专业的领域，因此相关内容没有包含在本书中。在希望所有读者对射频系统工程获得有用知识的同时，本书重点是那些对电路和微型组件工程和设备工程感兴趣的人提供最大的帮助。

目 录

第 1 章 无源元件	1	10.5.3 电容选择	113
1.1 电阻和电阻器	1	10.5.4 电感的选择	113
1.2 电容器	3	10.6 分离元件功率放大级	114
1.3 电感器和变压器	6	10.6.1 输出匹配方式	114
第 2 章 无源电路	9	10.6.2 集电极/漏极最大电压	115
第 3 章 射频传输线	16	10.6.3 集电极/漏极最大电流	115
3.1 工作在直流的传输线	16	10.6.4 集电极/漏极的效率	116
3.2 工作在射频的传输线	20	10.6.5 功率晶体管的封装	116
3.3 实际传输线	24	10.6.6 增益预期	118
第 4 章 射频变压器	27	10.6.7 散热设计和散热器	118
4.1 引言	27	10.6.8 偏置	119
4.2 变换器基础	27	10.6.9 反馈器件的选择	122
4.3 射频考虑	28	10.6.10 输入匹配	123
4.4 巴伦	34	10.6.11 稳定性考虑	126
4.5 传输线变换器	38	10.6.12 布局考虑	126
第 5 章 耦合器、混合器和定向耦合器	41	10.6.13 结构技巧	127
第 6 章 射频应用的有源器件	49	10.6.14 测量操作	127
第 7 章 射频小信号电路	65	第 11 章 发射机和接收机	131
第 8 章 调制与解调	74	第 12 章 高级结构	143
第 9 章 振荡器	90	第 13 章 电波传播	152
第 10 章 射频功率放大器	110	第 14 章 天线	161
10.1 需要考虑的安全隐患	110	第 15 章 衰减器和平衡器	175
10.1.1 铍氧化物	110	第 16 章 测量	179
10.1.2 高温	110	16.1 CW 信号的测量	179
10.1.3 射频高电压	110	16.2 调制测量	180
10.2 设计的第一个选择	110	16.3 频谱分析仪和网络分析仪	180
10.3 稳幅电路、驻波系数保护、 射频路径开关	111	16.4 其他仪器	181
10.4 设计的第一步	111	附录 1 有用的关系	186
10.5 低通滤波器设计	112	附录 2 s 参数	191
10.5.1 切比雪夫滤波器	112	附录 3 衰减器	193
10.5.2 椭圆滤波器	112	附录 4 通用谐振曲线	195
		附录 5 射频电缆	196

附录 6 线规和相关信息	199	附录 11 屏蔽	218
附录 7 软磁铁氧体和铁粉磁芯制造商	202	附录 12 全球最小外部噪声电平	225
附录 8 调制类型的分类	203	附录 13 频率分配及名称	228
附录 9 石英晶体	205	附录 14 短程设备	232
附录 10 椭圆滤波器	207	索引	234

第 1 章 无源元件

电子电路中的无源元件都要用到一个或多个电阻、电容和电感。另外的一些元件，如用作频率标准的晶体振荡器和压电发声器等，其性能取决于元件的电特性和机械特性间的相互作用。本章将重点介绍射频电路中所使用的无源元件，同时结合元件的不同使用目的介绍无源元件的内连接。

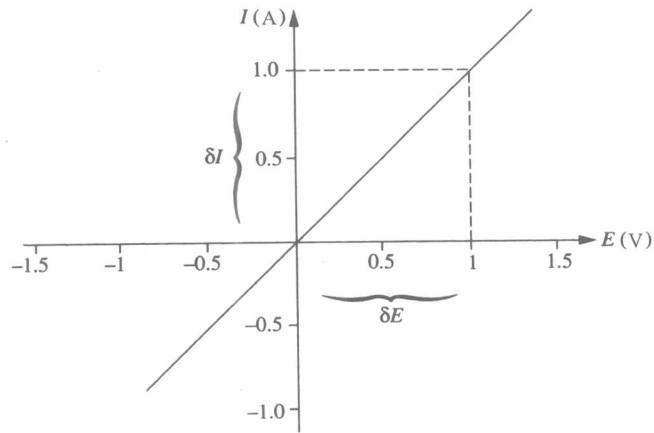
1.1 电阻和电阻器

具有良好的导电性能的物质称为导体 (conductor)。而像玻璃、聚苯乙烯、石蜡和聚四氟乙烯 (PTFE) 等物质，因为完全不具有导电性，称为绝缘体 (insulator)。绝缘体的电阻率大约是金属的 10^{18} 倍。尽管金属具有良好的导电性，但当金属中有电流通过时，仍具有一定的电阻，这就引起了导体的热损耗。当电动势 (EMF) 为 E (V) 的电源接在一段长度为 l (m)、横截面积为 A (m^2) 的导线两端时，导线中的电流 I (A) 可以用公式 $I = E / [(l/A)\rho]$ 来计算，式中 ρ 是导线的电阻率，分母 $(l/A)\rho$ 称为导线电阻，用 R 表示，因此 $I = E/R$ ，这就是欧姆定律。通常把电阻的倒数称为电导，即 $G = 1/R$ ，因此电流又可以表示为 $I = EG$ 。通过电阻器的电流与其上的电压的函数关系见图 1-1。

如果电流 I (A) 通过电阻 R (Ω)，那么耗散功率为 $W = I^2R$ (W 或 J/s)。尽管对导体以及在后面介绍的电感来说，不希望有电阻存在，但在很多实际电路中，具有确定阻值的电阻器很有用。线绕电阻器采用镍铬合金 (高功率型)、康铜或锰铜线 (精密型) 制成，其阻值从几分之一欧姆到约一兆欧姆。在相同的几何尺寸下，线绕电阻器比大多数其他类型的电阻器能耐受更大的功率。由于存在自感，线绕电阻器主要用于较低的频段。在高频段，薄膜电阻器和化合物电阻器应用更为广泛。在 20 世纪，碳膜电阻器或许是英国和欧洲最常使用的。它是在陶瓷骨架上沉积一层碳膜并在两端加上导电模帽构成的。开始制造时，其阻值只是最终值的百分之几，然后会在碳膜上自动刻上控制电阻值大小的螺纹，这就可将电阻值提高到设计要求的值。要求电阻器具有高功率或高稳定性时，可以使用螺旋线型的氧化锡或难熔的金属膜电阻器。由于螺旋线会产生一定的自感，在射频应用上是个不利的因素，或许正是这个原因，美国广泛使用碳化合物电阻器。这种电阻器由引线插入石碳酸管两端构成，既可以满足射频应用的要求，又有更优的性价比。目前，除了高功率应用以外，贴片电阻器已代替了有轴向引线的柱形电阻器。尤其是在射频设备中，如移动电话、GPS 接收机等。在这些应用中，由于尺寸小并可以忽略电感的特性。贴片电阻器成为了理想的选择。但在开发实验室中是不例外情况，在那里还会使用引线电阻。但即使是在实验室，在开发射频电路时，目前的发展趋势也是直接采用贴片电阻进行印制电路板。

贴片电阻有各种不同的尺寸和类别。典型的“1206”电阻器 (0.12 英寸^①长×0.06 英寸宽) 具有 250mW 的功率容量，“0603”电阻器具有 1/16W 和 100mW 两种规格，不同的厂商有不同的规格。

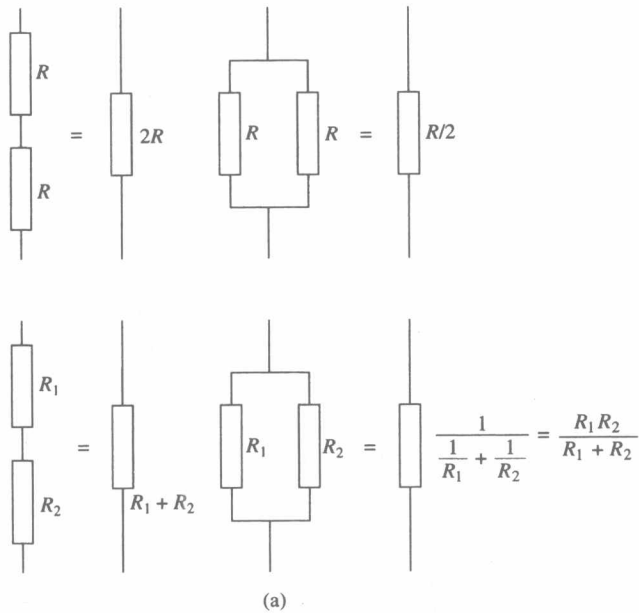
① 1 英寸约为 2.54cm。——编者注



线的斜率由 $\delta I / \delta E$ 确定。例如： $\delta I = 1A$ ， $\delta E = 1V$ ，电导 $G = 1S$ ，S（西门子）是电导的单位，以前又称为姆欧（mho）， $G = 1/R$

图 1-1 通过电阻器 $R (\Omega)$ 的电流与电阻器上的电压的函数关系。对于理想电阻器，该关系为线性关系。多数电阻器在直流和低频实用中是理想电阻器

当两个电阻器串联时，总的电阻值是它们的电阻之和；当两个电阻器并联时，总的电导是它们的电导之和，这些结论如图 1-2 所示。可变电阻器有三个接线端，其中两个分别接在电阻器的两端，



电阻器串联时，总电阻值为：

$$R_t = R_1 + R_2 + R_3 \dots$$

电阻器并联时，总电阻值满足：

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots$$

图 1-2 电阻器的连接

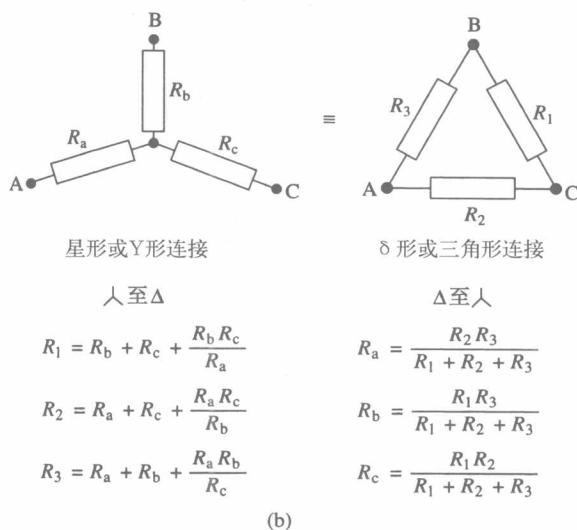


图 1-2 (续)

(a) 电阻器的串联与并联 (对阻抗也适用)

(b) 星形与三角形连接的转换 (对阻抗、负电阻也适用)

另一个接“接触片”或者“滑动片”，可以通过螺丝起子调整阻值（预置型可变电阻器），也可以通过转动旋钮或滑动触片调整电阻值。可变电阻器通常用来调节直流电平或者低频信号的幅度，但是在低频到甚高频（VHF），甚至更高频段，常用更小的预置型的可变电阻器。

2
3

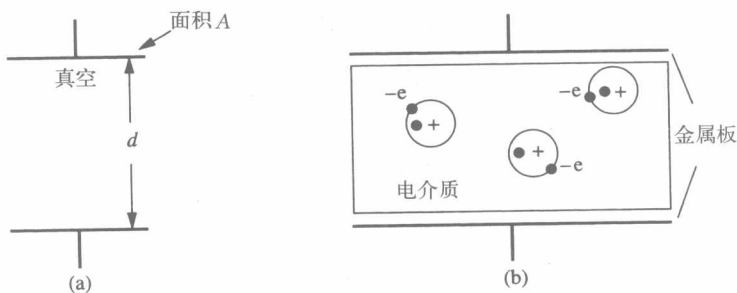
1.2 电容器

电子的运动引起电的传导(至少在金属中是这样)。1A 电流意味着在 1s 时间内有大约 6264×10^{14} 个电子流过导体中任意给定的一点。这个数量的电子构成了 1C 的电荷量，因此 1A 电流表示导体中每秒流过 1C 电荷。

金属中每个原子的外部电子都可以在原子核外的晶格中自由运动。当外加电动势如电池加在金属两端时，电子流过导体形成电流，金属中的电子流向电池正极（与习惯上的电流方向相反），并由电池的负极不断地提供电子进行补充。如果电容器是电路中的一部分，就不会形成连续的电流，因为电容器由两块金属板中间填充不导电的绝缘介质或真空所构成（如图 1-3a、图 1-3b 所示）。

电池跨接在电容器的两块金属板上会引起一些电子离开接电池正极的极板，而等量的电子又流到接电池负极的极板（如图 1-3c 所示）。如果外加电动势是 1(V) 时，电容器上存储了 1(C) 的电荷，则称这个电容器的电容量是 1(F)。电容量与极板面积 A 成正比，与极板间距离 d 成反比，因此 $C = kA/d$ （假设 d 远小于 A ）。在真空中，常数 $k = 8.85 \times 10^{-12}$ ，该常数即为自由空间的介电常数 ϵ_0 。因此在真空中， $C = \epsilon_0 (A/d)$ 。通常，电容器极板之间由空气或者固态绝缘物质填充，实际工程中一般认为空气的介电常数与自由空间的介电常数一致。绝缘体或电介质可以是空气、聚苯乙烯、陶瓷这样的不导电物质。这些绝缘体不导电是因为在绝缘体内，原子中的电子都被紧紧地束缚在原子内，不能挣脱出来。除非有很大的外加电场力，足以打破这种束缚并且影响介质的特性。绝缘体可以提供少量的电子（如图 1-3c 所示），其数量与外加电压成

正比。由于电介质中的电荷发生位移,使电容器在给定电压下,比真空填充时可以存储更多的电荷。由于电容器填充了相对介电常数为 ϵ_r 的电介质,电容器存储的电荷量增大,因此, $C = \epsilon_0 \epsilon_r (A / d)$,相应的存储电荷量为 $Q = CV$ 。电路中常使用的电容器,其最大电容值为 $500\ 000\ \mu\text{F}$ ($1\ \mu\text{F} = 10^{-6}\text{F}$),最小电容值为 1pF ($1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$)。即使不到 1pF 的杂散电容,也可能引起射频电路的故障。容量很大的电解电容器常用于直流电源中用于储能量和平滑波形。电容器能够存储的总能量为 $J = (1/2) CV^2$ (J) (每秒提供 1J 的能量就等于 1W 的功率)。



(-) 表示电子总是流向金属板的正极

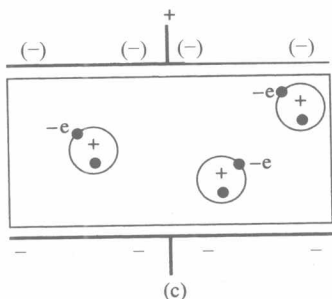


图 1-3 电容器

尽管直流电流不能通过电容器,但如果将一个正负交替变化的电压施加在电容器上,就会有电流在两个方向上交替变化,交变电动势会在电容器上引起明显的电流。在每个时刻都有 $Q = CV$,因此,施加在电容器两个极板上的电压变化率越大,电荷的变化率也就越大,就会产生更大的电流。如果在电容器 C (F)上施加一个正弦变化的电压 $V = E_{\max} \sin(\omega t)$ ^①,电容器上的电荷量为 $Q = CE_{\max} \sin(\omega t)$,电荷量的极大值出现在电压波形的波峰点,此时瞬间电压(和电荷)没有变化,因此电流为零。经过前期负的峰值电压后,电流将流入电容器,在电压变化率最大的地方出现电流最大值,即电流最大值出现在电压过零处。电流 $I = Cdv/dt = d(CE_{\max} \sin(\omega t))/dt = \omega CE_{\max} \cos(\omega t)$,该式表明:在电容器中,电流相位超前于电压相位 90° (如图 1-4 所示)。也可以看到,对于给定的 E_{\max} ,电流正比于施加在电容器上的交变电压的频率。电容器的“电抗”(reactance) X_c 决定了对于给定外加频率为 f (Hz) 的交变电压可以产生多大的电流,这里:

^① ω 是角速度 (angular velocity), 单位为弧度/秒 (rad/s)。一个周期有 2π 弧度, 因此, 对于 $\sin(20\pi t)$ 的一个正弦波, 每秒钟有 10 个周期或 10Hz, t 为时间, 单位为秒 (s)。

$I = E/X_c$, 其中 $X_c = 1/(2\pi fC) = 1/(\omega C)$, X_c 的单位是欧姆。若考虑电压和电流有 90° 的相移关系, X_c 可以写成 $X_c = 1/(j\omega C) = -j/(\omega C)$, 此处的“算子” j 表示电压相对于电流有 $+90^\circ$ 相移 ($j^2 = -1$, 所以 $1/j = -j$)。 $-j$ 表示电压相对于电流有 -90° 相移 (如图 1-4 所示)。电抗的倒数 B 称为电纳 (susceptance), 对于电容器: $B = 1/X_c = j\omega C$ 。

上文中提到的大的电解电容器, 常用于储存能量和平滑波形。尺寸较小的电容器用作“去耦”元件, 可以把不需要的交流信号旁路到地。频率更高时, 常用陶瓷电容器替代电解电容器或与其一起使用, 因为这种电容器的自感较小。电容值小的陶瓷电容器的温度系数低 (通常为 零), 使用 NP0^① 介质等级, 电容值超过 220pF 的电容器具有负的温度系数, 而对于电容值最大的陶瓷电容器 (仅用于去耦目的), 温度系数可以高达每摄氏度百万分之 $-15\ 000$ 。需要注意的是, 电容器在用作去耦元件时, 不要采用两个相同电容值的电容器并联, 因为在高频情况下, 电容器的引线电感产生的电抗比电容器的电抗大得多。由于陶瓷去耦电容器标称值的公差较大, 在某些频率下, 一个陶瓷电容器可能表现为电感, 而另一个仍然为电容, 如果这两个电容器并联, 在这个频率上将会形成一个并联谐振电路, 产生很高的阻抗, 从而失去预期的去耦作用。另外还有许多填充其他介质的电容器可供使用。电解电容器由于负温度系数可以抵消某些电感中铁芯的正温度系数而特别有用。可变电容器用在调谐电路中, 既可以作为用户“前面板”的控制元件, 又可以用于电路中作电容的预调整。

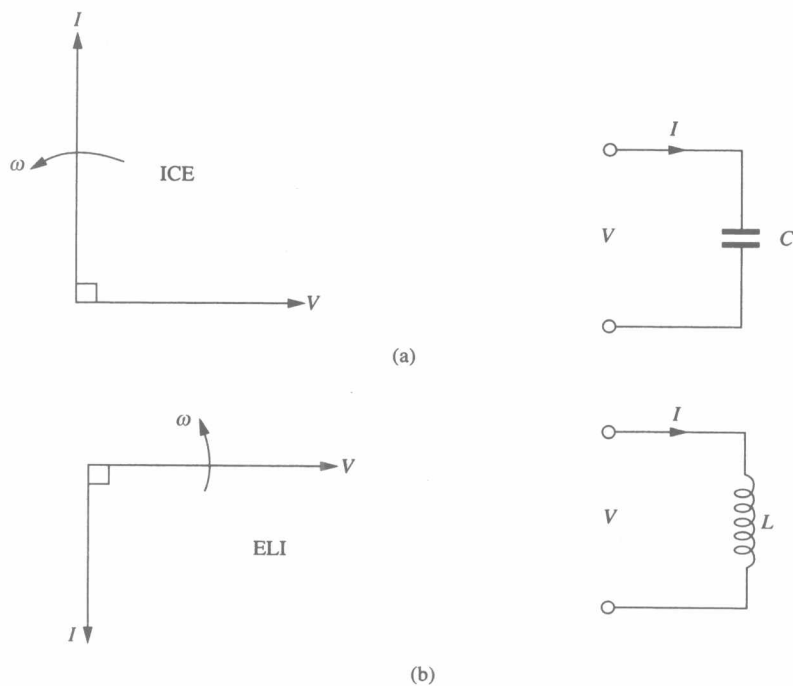


图 1-4 电压和电流的相位关系

- (a) ICE: 电流在电容器中引起的电动势 E (这里用 V 表示), 原点代表 0 电压, 常以地为参照
 (b) ELI: 跨接在电感器两端的电动势 E (这里用 V 表示) 引起的电流

① NP0 表示电容的温度系数为每摄氏度百万分之 -750 。NP0 表示标称温度系数为 0。

1.3 电感器和变压器

任何电流的周围都存在磁场，例如一段导线上流动的电流或是一道闪电形成的电流。磁场常用环绕导线的磁力线表示，越靠近导线的地方磁场越强（如图 1-5a、图 1-5b 所示）。图 1-5a、图 1-5b 显示了“螺旋法则”——顺着电流方向观察，磁通量（flux）的方向为顺时针方向。注意在图 1-5a 中，通常在导线端面上用“×”表示电流流入纸内，用“●”表示电流流出纸面。在图 1-5c 中，导线弯曲成了环形。注意所有通过电流环的磁通量线在同一个方向。对于有许多环或“匝”（turn）组成的螺线管结构（如图 1-5d 所示），磁通量线将环绕整个“螺线管”。如果有 N 匝线圈，流过线圈的电流为 I (A)，那么磁动势（MMF，类似于电动势 EMF） F 可写成 $F = NI$ (A)（有时又称为安培匝）。磁动势引起的磁通量（类似于电流）并不均匀，如图所示，在螺线管内部很集中，而在螺线管外部却是发散的。如果将一个长的细螺线管弯曲成环状或“环形室”（toroid）（如图 1-5e 所示），所有磁通量线都束缚在线圈内，并且分布均匀。环形螺线管内的磁场强度 H 取决于单位长度上的磁动势。实际上， $H = I/l$ (A/m)，这里 l 是螺线管的长度， I 是等效电流，为每匝上的电流乘以总匝数。在螺线管内的均匀磁场产生均匀的磁通密度 B [韦伯/平方米 (W/m^2)]， B 与 H 的比值 B/H 称为自由空间磁导率 μ_0 ，其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ 。如果螺线管横截面积为 A (m^2)，那么总的磁通量 $\Phi = BA$ (W)。如果螺线管绕在铁磁芯上，当螺线管内的磁场强度一定时，其内的磁通密度会增加 μ_r （相对磁导率）倍，于是 $B = \mu_0 \mu_r H$ 。更准确地说， $\Phi/A = \mu_0 \mu_r F/l$ 。因此：

$$\Phi = F / (l / (\mu_0 \mu_r A))$$

式中： $l / (\mu_0 \mu_r A)$ 又称为磁路中的磁阻 S ，磁阻的单位为安培/韦伯 (A/W)，类似于电路中的电阻。图 1-5e 中螺线管内部的磁路是均匀的。如果磁路非均匀，例如当螺线管内的铁磁芯只有半个圆环时，总磁阻就是不同部分的磁路的磁阻之和，类似于电路中总的串联电阻是各部分电阻之和。

当与电路相关的磁场发生变化时，电路上就会产生感生电压，这就是发电机的原理。同样，同一个电路中的电流发生变化也会引起磁通量变化。将电动势加在一个导线圈上，将产生电流，进而由电流又会形成磁通量，而增加的磁通量又会在线圈中产生与外加电动势反向的感生电动势，这就是著名的楞次定律 (Lenz's law)。如果磁通量的变化率为 $d\Phi/dt$ ，那么在每匝线圈中感生的“反向电动势”为 $E_B = -d\Phi/dt$ ，对于 N 匝线圈 $E_{B\text{total}} = -Nd\Phi/dt$ 。然而， Φ 等于磁动势/磁阻 $= NI/S$ 。其中 S 是与时间无关的量。则磁通量 Φ 随时间的变化率就等于：

$$d\Phi/dt = (1/S) (dNI/dt)$$

$$\text{因此：} E_{B\text{total}} = -Nd\Phi/dt = -N(1/S) (dNI/dt) = - (N^2/S) (dI/dt)$$

式中： N^2/S 表示电流的单位变化率所产生的感生电压，称为电感 L ，单位为亨利：

$$L = N^2/S$$

如果电动势 E 跨接在电阻器 R 两端，就会形成恒定电流 ($I = E/R$)，并在电阻器两端建立起电位差 (pd) V ，该电位差等于外加电动势。电动势向电阻器提供的能量为 $I^2 R$ ，该能量完全以发热的形式在电阻上消耗掉。然而，如果电动势 E 跨接在电感器 L 两端，将使电流增大，在电感器两端形成的反向电动势 V 就等于（非常接近）外加电动势，并且电感以磁场形式将电动势 E 提供的能量完全存储起来。任何时刻，若电感器中的电流为 I ，则电感器存储的能量就等于 $J = (1/2)LI^2$ 。

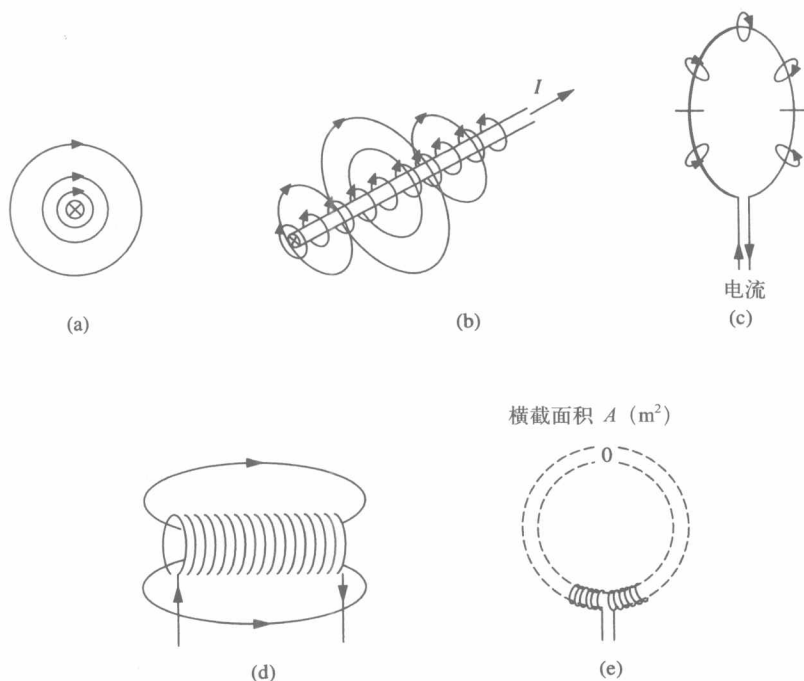


图 1-5 磁场

- (a) 导体的截面图。“x”表示电流流入纸面(“•”表示电流流出纸面)。习惯上用环绕导线的通量线表示磁场,沿电流方向观察,通量线为顺时针方向(螺旋法则)
- (b) 靠近导线的地方磁通量密度大,注意:磁通量线为闭合回路,离导线越远磁通量线的半径越大
- (c) 单匝电流环周围的环形磁场
- (d) 长的细螺线管产生管状磁场,线圈中有均匀的磁通量密度
- (e) 环形螺线管外部磁场为 0,管内的磁通量密度在螺线管的截面 A 上处处相等

如果正弦变化的电流 I 通过一个电感器,会产生一个正弦变化的反向电动势 E_B 。对于一定的电流,电流的时间变化率与频率成正比,因此,频率越高,反向电动势就越大。反向电动势的值由下式给出:

$$E_B = L \frac{dI}{dt} = L \frac{d(I_{\max} \sin(\omega t))}{dt} = \omega L I_{\max} \cos(\omega t)$$

8

该式表明:在电感器中,电压的相位超前电流的相位 90° (如图 1-4 所示)。电感器的电抗 X_L 决定了频率为 f (Hz) 的交变电压 E 加在电感器两端时,产生的电流的大小,即 $I = E/X_L$,此处 $X_L = 2\pi f L = \omega L$ 。考虑到电压相位超前电流相位 90° 的情况,可以将 X_L 写成 $X_L = j\omega L$ 的形式。电抗的倒数 B 又称为电纳,电感器的电纳 $B = 1/X_L = -j/\omega L$ 。注意电感与电流有关,即电感是针对整个电路而言的。因此,要问一段孤立的 1cm 长的导线所具有的电感量是毫无意义的。但是,在甚高频 (VHF) 或更高频率时,电路中的器件上一段 1cm 长的引线在 100MHz 频率时将会引入大约 6Ω 的感性电抗,记住这点是很有意义的。

实际上,电感器的绕线具有一定的电阻。当电感器工作于高频时,由于趋肤效应的影响使电流沿导线表面流动,从而减小了导线的有效截面积,使电感器中的电阻值高于直流工作时的电阻值,因此电感器的等效电阻值随频率升高而升高。在一些应用场合,电感器包含电阻的特性不一定是个缺点,甚至可能是个优点。常将射频扼流圈串联在直流电源与放大器之间,起去

耦作用。扼流圈在射频段有很高的阻抗，阻止信号耦合进/出放大级，或耦合到其他的放大级。这个阻抗不仅在放大器的所有工作频率范围要很高，而且理想情况下，对工作频率的谐波呈现的阻抗（尤其对 C 类放大器），以及在低于最低工作频率时都要具有高阻抗，因为射频功放管的增益非常高。要提供很高的阻抗，需要组合型扼流圈或两个值不相同的扼流圈串联。在超高频（UHF）频段，一种有效的方法是逐级扼流，这种线圈的一端缠绕紧密而另一端逐渐拉大间隙。在满足传输直流电流的前提下，绕线应尽可能细，这时使用具有电阻的绕线是有益的。在 VHF 和 UHF 频段，一种非常有效的替代方法是在馈线上滑动一到两个铁氧体磁珠，利用铁氧体在频率超过 10MHz 时损耗很大的梯度特性，使其在 RF 频段，与导线串联有等效阻抗，对直流却没有损耗。另一方面，电感器作为调谐电路的一部分，常常要求损耗电阻最小、 Q 值最高。对频率低到几兆赫兹的射频信号，采用有间隙的铁氧体（电感芯）电感可以很容易地使 Q 值高达 900。采用单层绕线可以获得最佳 Q 值。在较高的频率，如 VHF 频段，电感器通常用一个短的单层螺线管构成，可以安装铁氧体或铁粉插件来调节大小，有时还在螺线管外加铁磁罩或金属罩来屏蔽。螺线管的匝间距取半个线径比紧密绕制时的 Q 值高 10%~30%。固定的或可调整磁芯的可变电感器可以在许多厂商处购买到，如 Coilcraft、TOKO 或其他公司，这些公司还可提供固定的或可变的贴片电感。一些贴片（SMD）定值电感器为线绕结构，而另一些为多层片状结构，这种多层片状结构的电感器的稳定性更好，但 Q 值通常比线绕电感低。

两个在同一磁芯上的绕组构成了“变压器”，如图 1-6 所示，变压器将一个交流信号源的能量耦合到负载，而不必直接与负载相连。变压器的性能受到磁芯、绕线损耗以及漏感的限制。本书第 3 章将进一步讨论。

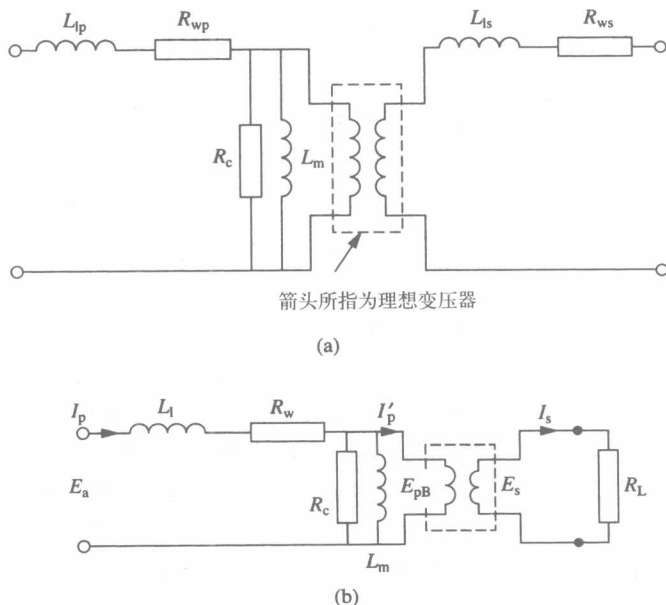


图 1-6 变压器

(a) 完整的等效电路

(b) 接了负载的变压器的简化等效电路