

电子学基础系列
ELECTRONICS



GAOPIN DIANLU JICHU

高频电路基础

陈光梦 编著

电子学基础系列
ELECTRONICS



GAOPIN DIANLU JICHU

高频电路基础

陈光梦 编著

 复旦大学出版社
www.fudanpress.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

高频电路基础/陈光梦编著. —上海:复旦大学出版社,2011.2
(复旦博学·电子学基础系列)
ISBN 978-7-309-07868-8

I. 高… II. 陈… III. 高频-电子电路-高等学校-教材 IV. TN710.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第012115号

高频电路基础

陈光梦 编著

出品人/贺圣遂 责任编辑/梁 玲

复旦大学出版社有限公司出版发行

上海市国权路579号 邮编:200433

网址:fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

门市零售:86-21-65642857 团体订购:86-21-65118853

外埠邮购:86-21-65109143

大丰市科星印刷有限责任公司

开本 787×960 1/16 印张 25.75 字数 452 千

2011年2月第1版第1次印刷

ISBN 978-7-309-07868-8/T·402

定价:45.00元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社有限公司发行部调换。
版权所有 侵权必究

内容提要

高频电路是高等学校电子科学与技术类专业的一门专业必修课，它主要研究高频电子电路的基本原理与基本方法。

本书共分8章，分别介绍高频无源网络、高频小信号放大器、高频功率放大器、高频振荡器、混频器、模拟调制与解调、数字调制与解调和反馈控制电路。在第1章、第2章、第3章以及第8章后各增加了附录，补充LC高频滤波器、S参数、E类和F类放大器以及DDS技术等内容。这些内容超出一般的教学要求，但从教学实践来看又很关键，可供需要深入学习的读者参考。

前 言

高频电路是大学本科电子类专业的一门专业必修课,它主要研究高频电子电路的基本原理与基本方法。由于集成电路的飞速发展,以前以晶体管为主的高频电路现在许多已经被集成电路所取代,因此在编写本教材时如何安排课程的内容就颇费思量。考虑到尽管许多电路已经集成化,但是高频电路的基本原理却还是必须用基本的晶体管电路才能说明的,所以本书的内容大部分以晶体管电路为主。考虑到现代无线电的发展,在传统内容的基础上也增加了一些基于集成电路的内容,尤其在数字调制与解调部分,实际电路几乎全部用集成电路构成,所以在本书中也以集成电路为主。

本书共分 8 章。

第 1 章介绍高频无源网络,主要讨论高频电路中常用的无源元件以及用无源元件构成的谐振回路、阻抗变换网络等。考虑到现在的高频通信系统中越来越多地采用微带线结构构成阻抗变换网络,在这一章中也简要介绍了微带线以及用微带线构成的阻抗变换网络,以及与之有密切关系的 Smith 圆图。

第 2 章讨论高频小信号放大器,以晶体管高频小信号放大器为主,也简单介绍了一些集成小信号放大器。主要内容有晶体管的高频参数描述,晶体管小信号放大器的设计,包括增益、稳定性等,还讨论了与小信号放大器密切相关的噪声问题。

第 3 章是高频功率放大器。重点是 C 类放大器和 D 类放大器,除了原理上的分析以外,还以实例的形式介绍了这两类放大器的设计过程。另外还介绍了传输线变压器及其应用,简单介绍了宽带功率放大器。

第 4 章讨论高频振荡器,重点是 LC 振荡器以及晶体振荡器。考虑到后面直接调频和锁相环两个环节的需要,将压控振荡器也安排在这一章。

第 5 章是混频器。这一章中很大的篇幅是介绍非线性电路的工作原理。在混频器电路部分,一方面是出自阐述原理的需要,另一方面是考虑到各种不同的混频器在不同的应用背景中还在实际使用,所以这部分电路既包含了很经典的二极管调制解调电路,也介绍了集成调制解调电路。这一章还分析了混频器电路中可能出现的各种干扰。

第 6 章介绍模拟调制与解调,第 7 章介绍数字调制与解调。这两章尽管都介绍调制与解调,但在内容的安排上有所不同。第 6 章重点在于已调信号的信号特

征分析,电路以晶体管为主,着重在于分析如何实现调制与解调。

第7章主要介绍一些基本的数字调制方式及其信号特征,考虑到学生以后还有信号与系统的课程,所以对于信号的分析介绍较少,而在具体电路中则以集成电路的应用为主。

第8章讨论反馈控制系统,包括自动增益控制、自动频率控制以及锁相环。考虑到学生在后面还有自动控制理论课程,所以反馈控制的基本理论仅作简单介绍,重点是应用电路系统。锁相环部分重点介绍了可以作线性分析的跟踪过程,其余部分则作简单介绍。最后对锁相环的具体应用作了一些概括性的介绍。

另外,在第1章、第2章、第3章以及第8章后面,各增加了一个附录,介绍LC高频滤波器、S参数、E类和F类放大器以及DDS技术等内容。这些内容超出一般的教学要求,但是从笔者的教学实践来看又是很关键的内容。尤其在近几年的全国大学生电子竞赛的辅导工作中,有许多学生主动找参考资料学习并向老师求教这些内容。在本教材中将它们作为附录,让需要深入学习的读者可以有一个入门的阶梯。

本教材曾经作为讲义用于本科教学。在教学过程中,深深感到教学相长的无穷魅力。许多学生不仅给我指出讲义中的笔误和错误,还就许多理论问题与我展开讨论。尽管其中有许多问题是学生的经验不够或其他原因所致,但是通过讨论也使我进一步认识到学生的思维方式以及讲义中的材料取舍等许多问题,这些经验指导我能够对教材作进一步的修订以期达到更完美的教学效果。我的同事唐长文博士也给我指出了一些教材中的错误和不妥。在此向唐长文博士以及给过我帮助的学生们致以诚挚的谢意。

虽然我尽力想将此书写成一本完善的教材,但是囿于本人的学识以及经验,本书中错误或不妥之处仍在所难免。恳切期待专家学者以及广大读者多多指教!

编者

2009年8月

目 录

前言	1
绪论	1
第 1 章 高频无源网络	6
§ 1.1 集总参数无源元件的高频电特性	6
§ 1.2 集总参数谐振回路	12
1.2.1 LC 谐振回路	12
1.2.2 LC 耦合谐振回路	20
1.2.3 固体谐振器	25
§ 1.3 集总参数阻抗变换网络	27
1.3.1 阻抗的串联-并联等效变换	28
1.3.2 互感耦合和电容分压式阻抗变换网络	29
1.3.3 LC 阻抗变换网络	35
§ 1.4 基于传输线的阻抗变换网络	40
1.4.1 传输线	41
1.4.2 微带线阻抗变换网络	49
§ 1.5 Smith 圆图及其应用	53
1.5.1 Smith 圆图的构成原理与特点	53
1.5.2 用 Smith 圆图进行计算	55
附录 LC 高频滤波器简介	62
习题与思考题	74
第 2 章 高频小信号放大器	77
§ 2.1 晶体管的高频特性	77
2.1.1 高频晶体管及其等效电路	77
2.1.2 晶体管网络参数	79
§ 2.2 高频小信号放大器的增益和频率特性	84
2.2.1 晶体管小信号调谐放大器	86
2.2.2 多级调谐放大器	97
2.2.3 其他形式的高频小信号放大器简介	99
§ 2.3 高频小信号放大器的稳定性	105

2.3.1	放大器的稳定性	105
2.3.2	稳定性设计	107
§ 2.4	高频放大器中的噪声和非线性	110
2.4.1	噪声的一般特性	111
2.4.2	高频放大器中常见的噪声来源	112
2.4.3	噪声的计算	115
2.4.4	接收机的灵敏度	124
2.4.5	放大器的非线性和动态范围	125
附录 S	参数	128
	习题与思考题	135
第 3 章	高频功率放大器	138
§ 3.1	C 类谐振功率放大器	138
3.1.1	导通角与集电极效率	138
3.1.2	C 类功率放大器的工作原理	141
3.1.3	C 类功率放大器的实际电路	149
§ 3.2	D 类谐振功率放大器	160
3.2.1	D 类功率放大器的工作原理	160
3.2.2	D 类功率放大器的实际电路	164
§ 3.3	功率分配与功率合成	167
3.3.1	传输线变压器	168
3.3.2	功率合成电路	174
§ 3.4	高频宽带功率放大器	179
附录 E 和 F	类和 F 类高频功率放大器简介	182
	习题与思考题	185
第 4 章	高频振荡器	188
§ 4.1	晶体管 LC 振荡器	188
4.1.1	LC 振荡器原理	188
4.1.2	三点式 LC 振荡器	196
4.1.3	差分电路 LC 振荡器	202
§ 4.2	石英晶体振荡器	204
§ 4.3	振荡器的一些实际问题与现象	208
§ 4.4	其他形式的振荡器简介	214
4.4.1	负阻振荡器	214

4.4.2 压控振荡器	215
4.4.3 多谐振荡器	220
4.4.4 数字集成电路构成的晶体振荡器	222
习题与思考题	222
第5章 混频器	225
§5.1 混频原理	225
§5.2 混频电路	230
5.2.1 线性时变电路	231
5.2.2 工作在开关状态的线性时变电路	237
5.2.3 模拟乘法器	246
5.2.4 其他形式的混频器	249
§5.3 混频器中的失真与干扰	252
5.3.1 副波道干扰	253
5.3.2 交调、堵塞与互调	255
5.3.3 干扰哨声	257
5.3.4 混频器的非线性与干扰的关系	258
5.3.5 接收机电路结构与抗干扰能力的关系	259
习题与思考题	263
第6章 模拟调制与解调	266
§6.1 振幅调制与解调	266
6.1.1 振幅调制的信号特征	267
6.1.2 振幅调制电路	271
6.1.3 振幅解调	274
§6.2 角度调制	285
6.2.1 角度调制的信号特征	285
6.2.2 直接调频电路	290
6.2.3 调相电路和间接调频电路	297
§6.3 调角信号的解调	301
6.3.1 振幅鉴频器	301
6.3.2 鉴相器和相位鉴频器	304
6.3.3 其他形式的鉴频电路以及鉴频器中的一些辅助电路	315
习题与思考题	317

第7章 数字调制与解调	321
§ 7.1 基本的二进制数字调制系统	321
7.1.1 振幅键控	321
7.1.2 频移键控	324
7.1.3 相移键控	326
§ 7.2 其他数字调制系统介绍	329
7.2.1 四相相移键控	330
7.2.2 正交调幅	332
7.2.3 最小偏移键控	333
§ 7.3 数字通信系统简介	335
7.3.1 ASK 与 FSK 系统	335
7.3.2 正交调制系统	340
习题与思考题.....	343
第8章 反馈控制电路	344
§ 8.1 反馈控制概述	344
§ 8.2 自动增益控制电路	348
8.2.1 自动增益控制原理	348
8.2.2 自动增益控制的电路构成	352
§ 8.3 自动频率控制电路	357
§ 8.4 锁相环	358
8.4.1 锁相环的基本结构与工作原理	359
8.4.2 锁相环的跟踪特性	366
8.4.3 锁相环的同步带	376
8.4.4 锁相环的捕捉带	378
8.4.5 锁相环的稳定性	381
§ 8.5 锁相环电路及其应用	382
8.5.1 频率合成	382
8.5.2 锁相接收	387
8.5.3 调制与解调	388
8.5.4 载波提取	391
附录 数字直接合成.....	392
习题与思考题.....	397
参考文献	400

绪 论

本课程研究高频电子线路。高频电子线路的一个主要应用方向就是如何通过电磁波传递能量和信息,通常称为无线电。无线电的历史,可以追溯到 19 世纪中叶。

英国科学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831~1879)在 1855~1864 年间发表 3 篇论文,提出位移电流概念,形成著名的麦克斯韦方程,奠定无线电科学的理论基础。

随后是德国科学家赫兹(Heinrich Rudolf Hertz, 1857~1894)在 1887 年完成关于电磁波实验,证明了麦克斯韦的理论,奠定无线电科学的实验基础。

再后来,意大利科学家马可尼(Guglielmo Marconi, 1874~1937)和俄国科学家波波夫(АлександрСтелановичПопов, 1859~1906)在 1894~1897 年间各自独立制成无线电收发报机,实现了世界上第一次无线电通信,这时已经有了无线电的雏形。

进入 20 世纪以后,无线电开始加速发展。这种发展在两条线上同时进行:一条线是器件方面的发展,另一条线是电路技术与应用方面的发展。

1904 年,John Ambrose Fleming 发明了真空二极管。1907 年,Lee de Forest 发明了真空三极管。而在随后的 1919~1940 年间,德国、荷兰、美国、英国以及前苏联科学家陆续发明了真空四极管、真空五极管、超短波速调管、微波磁控管等一系列电真空器件。

在此期间,无线电技术及其应用也得到极大发展。1906 年,Reginald Aubrey Fessenden 用调制的无线电波发送音乐和讲话进行广播试验。1912~1922 年间,Edwin Howard Armstrong、Reginald Aubrey Fessenden 等人发明了多种无线电接收技术,包括再生式接收技术、超再生接收技术、外差式和超外差式接收技术。1927 年,Harold Black 发明了负反馈电路。1933 年,Edwin Howard Armstrong 发明了宽带调频原理,首次进行调频制广播。20 世纪 30 年代中期到 40 年代,出于军事的需要,雷达开始投入使用。随后又发展了射电天文学和无线电气象学等。到了 20 世纪中叶,现代的模拟信号发送和接收技术几乎都已经出现并投入使用。

在 20 世纪中叶,又出现了两个里程碑式的发明。

其一是 1948 年由 3 位科学家巴丁(John Bardeen)、肖克利(William

Schokley)和布莱顿(Walter Houser Brattain)发明了晶体三极管,从此固体电子学隆重登场。而自从 Clair Kilby 和 Robert Noyce 在 1958 年各自独立地制成了最早的集成电路后,电子学进入微电子时代。随着制造工艺的日臻完善,集成电路的规模越来越大,而且还在不断以被称为摩尔定律的速度,即每 18 个月翻一番的速度增长。随着集成电路规模的扩大及其应用领域的日益广泛,我们的世界已经逐步建立在硅的基础上。

另一个里程碑式的发明是 20 世纪 40 年代电子计算机的发明以及随后由于集成电路的飞速发展导致的计算机微型化,它极大地改变了无线电技术的发展进程。电子计算机从开始发明时的一个庞大机器发展成一个小小的芯片,微处理机的出现使得计算机技术可以嵌入到各种实际应用系统中,它最终使得现代无线电技术从模拟信号系统发展为模拟-数字混合信号系统。许多以前只是停留在理论阶段的设想开始逐步成为现实,其中最重要的当数软件无线电,它对现代无线电的变革起到相当深刻的影响。

以前的无线电系统中,所有的信号变换过程都是通过硬件电路实现的。这样的系统一旦组成就难以更改,稳定性虽好但是灵活性很差。理想的软件无线电思想是:除了发送的功率放大器与接收的前端放大器仍然采用硬件实现外,其余的信号变换功能全部用软件实现。显然,由于软件的灵活性,这样的系统是柔性的、灵巧的,可以应付各种变化的环境。而由于高集成度的支持,这样的系统体积小、功耗低。

显然,若没有微电子技术和计算机技术的发展,上述系统将是无法实现的。尽管目前软件无线电技术还不能达到完全理想的模式,但是已经开始应用在包括军事与民用的许多领域。

总之,现代无线电技术已经深入到我们每个人生活的每个角落。无论是日常生活中的广播、电视、手机、无线网络,还是飞机导航、船舶定位、微波通信、卫星通信等等,都离不开无线电技术。现在已经不能想象没有无线电的世界将是什么状况。

从信息的角度来看,所有无线电技术的发展都是围绕着信息的收集、传送、存储和还原展开的。

信息信号通常包含语音、图像、各种遥控遥测数据等,可以分为模拟信号和数字信号两大类。信息信号的特点是:频率一般都比较低,占有一定的频宽,例如语音信号的频率为 300 Hz~3 400 Hz,音乐信号的频率为 20 Hz~20 kHz,电视图像的频率为 0~6 MHz 等。由于频率低,信息信号一般无法直接通过无线方式传送。

为了远距离传送信息,需要用低频的信息信号去控制一个称为载波的高频电

磁波。目前无线电可以利用的高频电磁波频率范围大约从几千赫到几千吉赫。为了讨论问题方便,通常将这些频率人为分成多个频段,划分标准见表 0-1。

表 0-1 无线电频段的划分

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称	
超长波	100 km~10 km	(3~30)kHz	甚低频(VLF)	
长波	10 km~1 km	(30~300)kHz	低频(LF)	
中波	1 km~100 m	(300~3 000)kHz	中频(MF)	
短波	100 m~10 m	(3~30)MHz	高频(HF)	
超短波(米波)	10 m~1 m	(30~300)MHz	甚高频(VHF)	
微波	分米波	1 m~10 cm	(0.3~3)GHz	特高频(UHF)
	厘米波	10 cm~1 cm	(3~30)GHz	超高频(SHF)
	毫米波	10 mm~1 mm	(30~300)GHz	极高频(EHF)
	亚毫米波	1 mm~0.1 mm	(300~3 000)GHz	超极高频

无线电波的传播方式与其波长有关。

通常,超长波段由于波长太长,难以通过天线发射而较少用于无线通信,而多用于工业设备以及一些民用电子设备中。

长波到中波波段的电磁波波长较长,绕射能力强,可以沿着地球表面传输,故称为地波。信号稳定是这一频段电磁波的主要优点,但是由于大地的吸收,使得它在传输过程中的衰减很大,需要很大的发射功率。长波主要用于需要稳定传输信号的无线通信中,中波则用于民用语音广播和一些通信应用中。

随着波长的下降,电磁波的绕射能力减弱。所以短波波段的电磁波主要通过大气的电离层和大地的来回反射,在整个地球表面传输,称为天波。由于大地的吸收减弱,天波可以用较小的功率传送较远的距离。但是由于受到电离层起伏的影响,信号不稳定,有明显的衰落现象。通常短波段用于各种用途的通信中,也可用于语音广播。

由于波长越短,电离层的反射越弱,超短波到微波波段的电磁波基本上完全按照空间直线传播,称为空间波。该波段主要用于通信,频率较低的一部分用于电视广播。许多民用通信设备,例如手机、蓝牙、无线网络等使用的频率均在该段频率范围内。工业、科学与医学设备使用的频率也在这一频率范围内。在这一频率范围中有几个特别的频段,大气层对其的吸收和反射特别小,卫星通信的频率就位于

这些频段内。

为了有效地利用有限的频率资源,世界各国都对无线电设备的使用频率加以严格规范。表 0-2 就是我国目前用于语音广播和电视广播的频段划分。

表 0-2 广播与电视的频率范围

波 段		频率范围
中波语音广播		(535~1 605)kHz
短波语音广播		(3~22)MHz
调频语音广播		(88~108)MHz
电视广播	1~5 频道	(48.5~92)MHz
	6~12 频道	(167~223)MHz
	13~24 频道	(470~586)MHz
	25~68 频道	(606~958)MHz

前面提到为了传送信息需要用信息信号控制高频电磁波,使载波包含信息。这个过程称为调制。调制的方法可分为调幅、调频和调相 3 类,带有信息的载波称为已调波。调制的主要作用是:(1)高频无线电波容易发射;(2)由于已调波的频率远高于信息信号的频率,所以信息容量大大增加。反过来,从一个已调波中将信息信号还原出来的过程称为解调。图 0-1 和图 0-2 就是无线通信设备(例如无线对讲机或无绳电话)的发射部分和接收部分的结构框图。

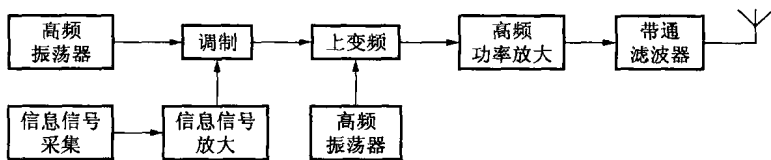


图 0-1 无线通信发射设备的结构框图

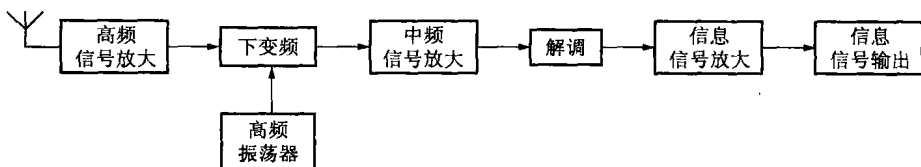


图 0-2 无线通信接收设备的结构框图

在上述结构框图中,有关信息信号的采集、放大等环节,大部分已经在低频电路课程中解决,部分内容(如传感器等)需要在后续的相关课程(包括实验课程)中介绍。本课程的研究对象是信息通过无线电波传输的原理、过程与方法,研究内容包括上述框图中除信息信号以外的部分,但又不局限于此。

广义地说,凡是与高频无线电信号的产生、发送、接收与放大的电路及其原理都应该在高频电路课程研究范围之内。考虑到学生是第一次接触无线电原理,所以本课程基本上以传统的无线线路为主,包含高频线性网络的结构与原理、高频放大器、高频振荡器、非线性电路的原理及其在无线电电路中的应用、信号的调制与解调、无线电系统的组成原理等。由于是高频电路的基础课程,软件无线电等现代无线电的内容不包含在本课程中,但是其基本原理在本课程中有所涉及。

由于高频电路比低频电路要复杂许多,一些电路现象也不像低频电路中的那样直观与简单,而且高频电路中多以元器件的非线性特性为其工作的基础,所以在学习本课程时,需要注意对电路的分析过程、尤其对其中涉及的一些基本原理加深理解。要注意避免两个极端:一是由于其复杂而望而生畏,不进行认真分析;二是一味追求数学上的求解过程,反而忘记探究其物理本质。事实上,我们在分析和解释一个具体电路的过程中,常常会对数学上的描述进行合理的简化与近似,而这正是在掌握了电路的物理本质后才能够准确做到的。

本课程的内容与工程实际密切相关,实验是学好本课程必不可少的一环。本课程的后续课程有高频电路实验。本教材每章后面的习题中,大部分习题是通过实验验证的,也有部分设计性的习题可以直接作为实验题目。通过实验,不但可以验证课本上讲述的内容,还可以观察到许多课本上未曾提及的现象。合理地分析和解释这些现象,需要全面掌握课本上的知识,也能够得到许多实际的经验,而丰富的实际经验是一个研究高频电路的人的宝贵财富。总之,读者必须很重视实验,才能真正掌握高频电路知识。

第 1 章 高频无源网络

无源网络一般是指不包含晶体管等有源元件的电网络。在高频电路中,无源网络通常担负着滤波、阻抗变换等功能,还为晶体管等有源元件提供直流供电和直流偏置回路。随着频率的升高,许多在低频领域被忽略的分布参数的影响也开始显现。由于无源网络在高频电路中起到十分关键的作用,本章首先研究无源网络的结构及其高频特性。

§ 1.1 集总参数无源元件的高频电特性

高频电路中的无源元件(passive component)大致可分为集总参数(lumped parameter)元件与分布参数(distributed parameter)元件两类。

集总参数无源元件主要是电阻器、电容器和电感器(电感线圈)等。一个实际的电阻器、电容器或电感线圈,在低频时主要表现为电阻、电容或电感特性,即标称特性。例如,一个电阻器的电气特性就是其阻值 R ,且与频率无关。一个电容器或电感线圈的电特性就是其电容值 C 和电感值 L 。但是在高频情况下,它们的电特性有所变化,这些变化主要是由于元件的分布参数造成的。所以,这些元件在高频使用时不仅标称特性的数值会发生变化,而且还表现出标称特性所没有的阻抗特性。这些由分布参数反映的特性影响着元件的高频特性。影响无源元件电特性的分布参数主要有损耗电阻、分布电容和分布电感。

一、分布参数对于集总参数无源元件高频电特性的影响

众所周知,电容 C 和电感 L 的电抗与频率有关,即

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (1.1)$$

$$X_L = 2\pi fL \quad (1.2)$$

在频率不高的情况下,公式(1.1)和(1.2)很好地描述了电容和电感的电特性。但是随着频率的提高,分布参数的高频效应开始显现,上述公式将不能完全准确地描述它们的电特性。

首先讨论高频损耗。

对于电感线圈来说,损耗主要来自绕制线圈的导线的电阻。而且在高频情况下,此电阻还不止于导线的直流电阻。

在低频情况下,导线中的电流几乎是均匀地分布于整个导线截面。但是随着频率的升高,交流电流向导线表面集中,这一现象称为趋肤效应(skin-effect)。产生趋肤效应的原因是:交流电流在导线周围产生了交变磁场,而此交变磁场又在导线内感应一个感生电场,此电场的方向与原始的电流方向相反,而且在直导线中心的感生电场强度最大,所以直导线中心的电流密度最低,而表面的电流密度最高。当频率很高时,导线中心部位几乎完全没有电流流过,这相当于把圆导线的横截面积减小为圆环面积。理论计算表明,在高频情况下,导线中的电流密度随直径减小而迅速减小。若我们定义电流减小到总电流的 $1/e$ 的深度为趋肤深度(skin depth),则在导线表面下趋肤深度内将具有大部分的电流,而在此深度以下几乎没有电流。

趋肤深度与电流频率、导线截面形状以及电流回路的形状有关。无限长的圆直导线的趋肤深度 δ 可以近似表示为

$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (1.3)$$

其中 μ 为磁导率, σ 为导线材料的电导率, f 为信号频率,均采用国际单位制。

根据(1.3)式,可以画出常用导电材料制成的直导线的趋肤深度与频率的关系如图 1-1。

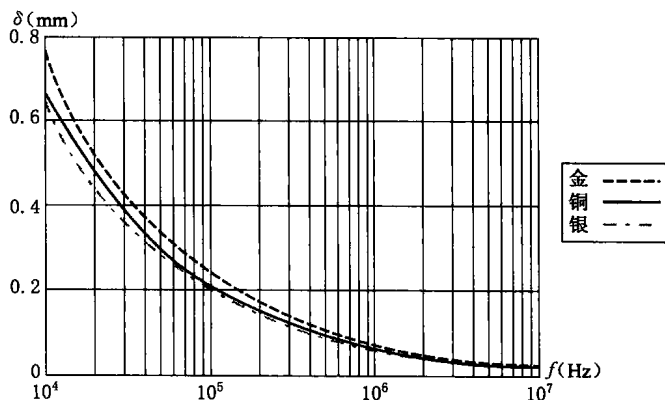


图 1-1 常用导电材料制成的圆直导线的趋肤深度与频率的关系