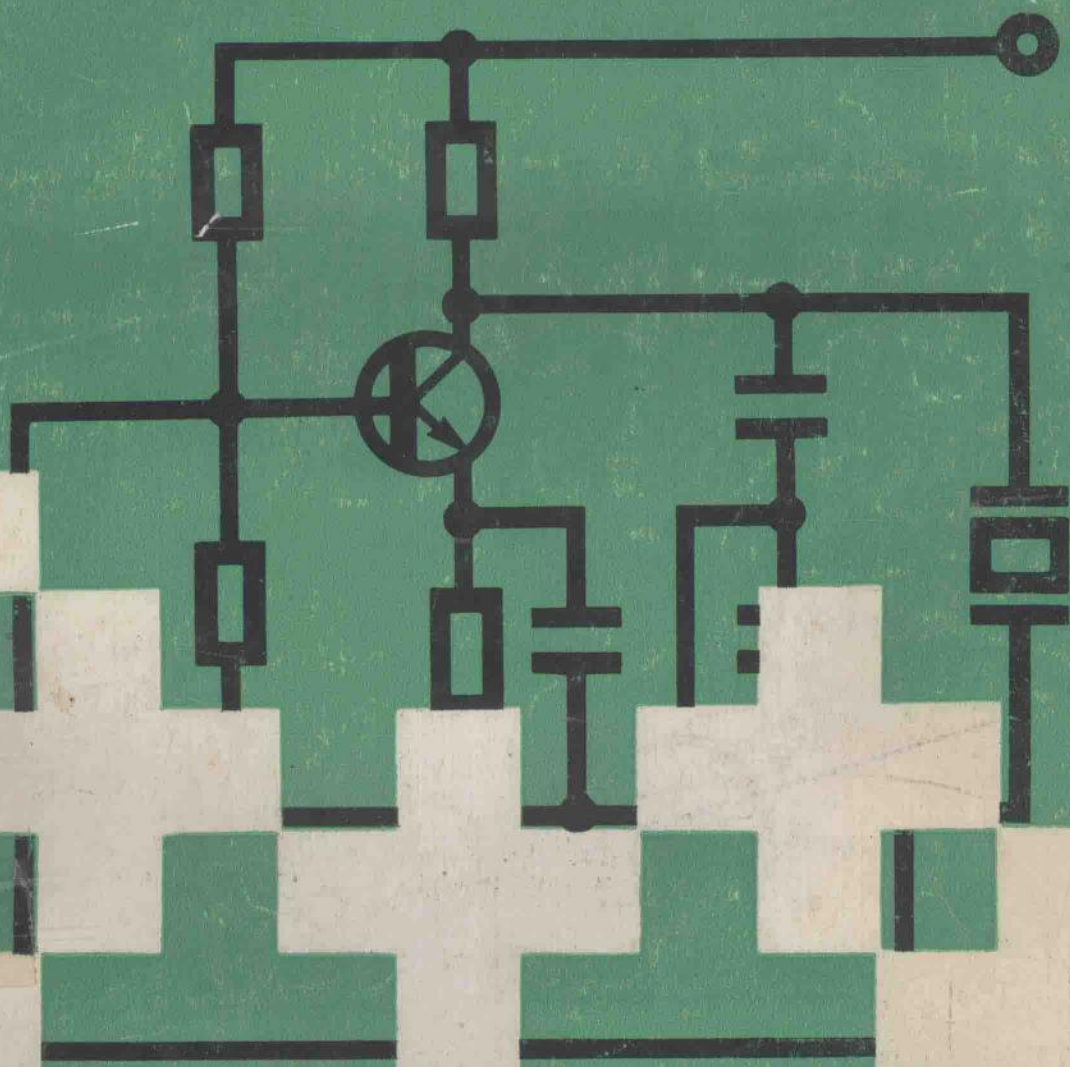


医用电子技术基础

主编 关香生 吴锦城



湖北科学技术出版社

医用电子技术基础

主 编 关香生 吴锦城

副主编 潘传芳 白英侃

编 委 (以姓氏笔划为序)

尹 玲 白英侃 关香生

刘国刚 芦生锦 吴锦城

陆 蓉 赖生贵 潘传芳

湖北科学技术出版社

鄂新登字 03 号

医 用 电 子 技 术 基 础

© 关香生 吴锦城 主编

*

湖北科学技术出版社出版发行

中南财经大学印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 12.25 印张 300 千字

1994 年 5 月第 1 版 1994 年 5 月第一次印刷

ISBN7-5352-1527-01R·293

印数:1-6000 定价:7.65 元

前 言

医用电子技术是一门新兴的边缘学科。随着当代电子技术与计算机技术的迅猛发展,现代医学研究手段的电子化与电脑化的趋势已愈演愈烈,反映了现代医学对电子技术的强烈需求,同时也反映出医用电子技术的繁荣,对于促进现代医学发展与进步产生不可估量的影响。

在这种形势下,诸多医学院校都已开设了医用电子技术必修课或选修课。为了有一本适合医学院校专业特点并适合医学生学习的教材,湖北医科大学、同济医科大学、川北医学院、湖北省药检专科学校联合编写了本书。

编者多数是各院校讲授本课程多年、具有一定教学经验的教师。本书的两次编审会实际上就是上述院校的教学经验的总结。为了适应高等医学院校学生的实际水平、以期达到易教易学的目的,本着加强基础、适当介绍医用电子技术的最新成果的初衷,兼顾研究生、本科生、专科生各专业的需要,故共编了十四章,教师可根据不同对象与授课时数适当取舍选用。各章配有少量习题,供学生复习巩固所学知识用。

本书可作为高等医学院校各专业的研究生、本科生、专科生的医用电子学课程的教材,也可供从事生物物理、生物医学工程与生理学研究的工作者和从事与生物信号检测有关的医师、技师及医疗器械维修人员参考。

本书第一、三、四、六、九、十、十二、十三章由关香生、潘传芳、白英侃审稿;第二、五、七、八、十一、十四章由吴锦城审稿;全书由潘传芳统稿,最后由关香生、吴锦城、潘传芳共同审订定稿。

本书成书尚属仓促,加之编者水平所限,不妥之处在所难免,诚望各方同仁多予以批评指正,以便再版时修订改进。

本书的出版得到了湖北科技出版社与上述四院校的大力支持,在此谨致谢忱。

编 者

1994年5月

目 录

第一章 电路分析基础 (1)	一、半导体三极管的结构的符号	(19)
§ 1-1 电路的基础知识..... (1)	二、半导体三极管的连接方法.....	(19)
一、电流、电压的参考方向量..... (1)	三、半导体三极管电流分配的物理过程	(20)
二、电路	四、半导体三极管的特性曲线.....	(20)
三、电源	五、半导体三极管的主要参数.....	(22)
§ 1-2 电路的基本定律..... (2)	六、半导体三极管的等效电路.....	(22)
一、有源支路欧姆定律	§ 2-4 可控硅	(23)
二、基尔霍夫定律	一、可控硅的结构和符号.....	(23)
三、迭加原理	二、可控硅的工作原理.....	(23)
四、戴维南定理	三、可控硅的特性曲线.....	(24)
五、功率匹配定理	§ 2-5 单结晶体管	(24)
§ 1-3 正弦交流电路的稳态分析..... (6)	习题二	(25)
一、复数的表示法	第三章 基本放大电路	(26)
二、正弦交流电的复数表示法	§ 3-1 共射极放大电路	(26)
三、交流电路的复数法	一、共射极放大电路的组成.....	(26)
四、 R 、 L 、 C 谐振电路	二、放大电路的工作过程.....	(27)
§ 1-4 信号的频谱及选频网络 ... (11)	三、放大电路的主要性能指标.....	(27)
一、周期信号的频谱分析.....	§ 3-2 放大电路的分析方法	(29)
二、 RC 低通、高通滤波网络	一、交流通路和直流通路.....	(29)
三、双 T 选频网络	二、近似计算法.....	(29)
习题一	三、图解分析法.....	(30)
第二章 半导体器件的基本知识	四、微变等效电路法.....	(33)
§ 2-1 半导体的导电特性	§ 3-3 静态工作点的稳定	(34)
一、本征半导体和本征激发.....	一、静态工作点受温度影响的情况	(34)
二、 P 型半导体和 N 型半导体 ... (15)	二、分压式偏置电路.....	(35)
§ 2-2 半导体二极管	§ 3-4 多级放大器	(36)
一、 PN 结的形成	一、多级放大器的级间耦合方式	(37)
二、 PN 结的单向导电性	二、多级放大器的性能指标.....	(37)
三、半导体二极管.....		
四、稳压管.....		
§ 2-3 半导体三极管		

习题三	(38)	三、集成运放的理想特性	(65)
第四章 场效应管放大器	(40)	§ 6-2 运算放大器组成的基本 电路	(66)
§ 4-1 结型场效应管	(40)	一、反相比例放大器	(66)
一、结型场效应管的结构和工作 原理	(40)	二、同相比例放大器	(66)
二、结型场效应管的特性曲线	(41)	三、差分运算放大器	(67)
三、场效应管的主要参数	(44)	§ 6-3 运算放大器在信号运算 方面的应用	(67)
§ 4-2 绝缘栅场效应管	(44)	一、求和运算	(67)
一、N 沟道增强型绝缘栅场效应 管	(44)	二、积分运算	(68)
二、N 沟道耗尽型绝缘栅场效应 管	(45)	三、微分运算	(68)
§ 4-3 场效应管基本放大电路 ..	(46)	四、对数运算	(69)
一、自给偏压偏置电路	(46)	五、反对数运算	(69)
二、分压式偏置电路	(46)	六、高级运算	(69)
三、静态工作点的确定	(46)	§ 6-4 运算放大器其他应用 举例	(70)
习题四	(47)	一、比较器	(70)
第五章 几种常用的放大器	(48)	二、测量放大器	(70)
§ 5-1 负反馈放大器	(48)	三、有源滤波电路	(71)
一、反馈的基本概念	(48)	§ 6-5 运算放大器的调零与 补偿	(72)
二、反馈的分类与判别	(49)	一、调零	(72)
三、负反馈对放大器性能的影响 ..	(51)	二、位相补偿	(73)
四、负反馈放大器的特例——射 极输出器	(53)	习题六	(74)
§ 5-2 直流放大器	(54)	第七章 正弦波振荡电路	(75)
一、直接耦合放大器	(54)	§ 7-1 自激振荡原理	(75)
二、差分放大器	(56)	一、振荡电路的结构	(75)
§ 5-3 功率放大器	(58)	二、自激振荡条件	(75)
一、功率放大器的特点	(58)	三、自激振荡的建立和稳定过 程	(76)
二、甲类功率放大器	(59)	§ 7-2 RC 振荡器	(77)
三、推挽功率放大器	(60)	一、RC 移相振荡器	(77)
四、互补对称功率放大器	(61)	二、RC 桥式振荡器	(77)
习题五	(63)	§ 7-3 LC 振荡器	(80)
第六章 集成运算放大器	(64)	一、变压器耦合式振荡器	(80)
§ 6-1 运算放大器的结构与 特性	(64)	二、电感三点式振荡器	(81)
一、运算放大器的结构	(64)	三、电容三点式振荡器	(81)
二、运算放大器的主要参数	(64)	§ 7-4 石英晶体振荡器	(82)
		一、石英谐振器的特性	(82)

二、两种典型的石英晶体振荡器	(83)	三、编码器	(113)
习题七	(85)	四、译码器	(114)
第八章 脉冲电路	(86)	习题九	(116)
§ 8-1 脉冲电路的基本知识	(86)	第十章 时序逻辑电路	(117)
一、脉冲的波形及参数	(86)	§ 10-1 触发器	(117)
二、RC 电路的暂态过程	(87)	一、基本 RS 触发器	(117)
三、RC 微分电路	(88)	二、钟控 RS 触发器	(118)
四、RC 积分电路	(89)	三、JK 触发器	(119)
五、RC 分压电路	(90)	四、D 触发器	(120)
§ 8-2 晶体管的开关作用	(90)	五、T 触发器和 T' 触发器	(120)
一、晶体管的开关特性	(90)	六、不同类型触发器的相互转换	(121)
二、带有加速电容的晶体管开关电路	(91)	§ 10-2 寄存器	(122)
§ 8-3 脉冲单元电路	(92)	一、数码寄存器	(122)
一、双稳态触发电路	(92)	二、移位寄存器	(123)
二、射极耦合触发器	(94)	§ 10-3 计数器	(124)
三、单稳态触发器	(95)	一、异步二进制加法计数器	(124)
四、自激多谐振荡器	(97)	二、异步二进制减法计数器	(125)
五、单结晶体管振荡器	(98)	三、同步二进制加法计数器	(126)
§ 8-4 锯齿波发生器	(99)	四、8421 码同步十进制加法计数器	(126)
一、锯齿波	(99)	五、8421 码异步十进制加法计数器	(128)
二、简单的锯齿波发生器	(99)	习题十	(129)
三、恒流源锯齿波发生器	(100)	第十一章 稳压电源	(130)
习题八	(101)	§ 11-1 整流和滤波电路	(130)
第九章 组合逻辑电路	(102)	一、整流电路	(130)
§ 9-1 逻辑函数与逻辑运算	(102)	二、滤波电路	(132)
一、二进制数与十进制数	(102)	三、可控硅整流电路	(134)
二、基本逻辑运算与基本逻辑门电路	(103)	§ 11-2 直流稳压电源	(135)
三、逻辑代数的基本定律	(105)	一、串联型晶体管稳压电路	(135)
四、逻辑函数表达式与逻辑图	(106)	二、集成化的串联型稳压电源	(139)
§ 9-2 逻辑函数的化简	(106)	§ 11-3 交流稳压电源	(139)
一、逻辑函数的代数化简法	(106)	一、磁饱和稳压器	(140)
二、逻辑函数的卡诺图化简法	(107)	二、电子交流稳压器	(141)
§ 9-3 组合逻辑电路	(110)	习题十一	(143)
一、组合逻辑电路的分析和设计方法	(110)	第十二章 生物医学传感器	(145)
二、加法器	(112)	§ 12-1 生物医学用电极	(146)
		一、医用电极的基本特性	(146)

二、几种常用医用电极	(148)	二、降低噪声的措施	(168)
三、电极的阻抗及测量法	(150)	§ 13-4 微弱信号的检测方法 ...	(169)
§ 12-2 生物医学用换能器	(152)	一、叠加平均法	(169)
一、医学换能器的分类和要求 ...	(152)	二、相关检测法	(170)
二、医用换能器介绍	(152)	三、自适应噪声抵消技术	(171)
§ 12-3 生物传感器	(155)	第十四章 生物医学信号的显示和记录	(173)
一、生物传感器基础电极介绍 ...	(155)	§ 14-1 屏幕显示装置	(173)
二、酶传感器	(156)	一、显像管的结构及工作原理 ...	(173)
三、微生物传感器	(157)	二、A型超声诊断仪的工作原	
四、免疫传感器	(157)	理	(174)
五、药物传感器	(158)	三、B型超声诊断仪的工作原	
第十三章 生物医学信息的检测		理	(175)
与处理	(159)	四、M型超声图	(177)
§ 13-1 生物信息的特性及测量		§ 14-2 直接描记式仪器	(177)
要求	(159)	一、描笔偏转式记录器	(177)
一、生物信息的特性	(159)	二、自动平衡式记录器	(179)
二、生物信息测量的特殊性	(160)	§ 14-3 磁带记录器	(182)
§ 13-2 测量中的干扰及其抑		一、磁带记录原理	(182)
制	(161)	二、模拟式磁带记录器	(183)
一、干扰的来源及耦合途径	(161)	三、数字式磁带记录器	(185)
二、抑制干扰的措施	(163)		
§ 13-3 噪声及其降低的措施 ...	(167)		
一、噪声的来源	(167)		

第一章 电路分析基础

掌握电路分析方法是学习电子技术的基础。作为本书的开篇,本章主要介绍一些电路的基础知识、基本定律和定理,以及常用的电路分析方法。

§ 1-1 电路的基础知识

一、电流、电压的参考方向 电流、电压不是向量,但在实际电路中,它们有自己的真实方向。在求解一个较复杂的电路时,往往难以事先判断出电流、电压的真实方向。为解决这样的困难,可以先任意设定电流、电压的参考方向,然后进行计算。如果计算出的值为正,则电流、电压的真实方向与设定的参考方向相同;如果计算出的值为负,则真实方向与设定的参考方向相反。

二、电路

1. 电路和电路图 电流所流过的路径叫做电路。电路的作用是分配电能,达到电能与其他形式能量相互转换的目的。电路一般由三部分组成:①电源,将其他形式的能量转换成电能;②负载,将电能转换成其他形式的能;③各种电气元件、器件及联接导线。

在画电路时,通常是用一些图形符号来代替各种实物,这样画出的电路叫电路图。电路图并不能反映实际电路的几何尺寸及形状。

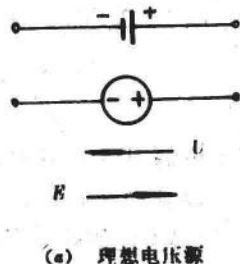
2. 线性电路和非线性电路 在电路中,原因和结果是属于线性(一次幂)关系的电路叫做线性电路;原因和结果是属于非线性关系的电路叫做非线性电路。

3. 简单电路和复杂电路 凡是可以用串联、并联直接化简后,能用欧姆定律求解的电路为简单电路;凡是不能用串联、并联直接化简的,即不能用欧姆定律直接求解的电路为复杂电路。简单电路和复杂电路不是以元件的多少来区分的。

三、电源 电源有电压源和电流源两种,参见图 1-1。

1. 电压源 理想电压源(恒压源)理解为:输出电压不变,输出电流可以变,电源内阻为零。在图 1-1(a)中, U 指电压的方向, E 指电动势的方向,且 U 等于 E 。实际电压源,其内阻不为零,输出电压随输出电流的增大而下降,它可以用一个恒压源 E 和一个内阻 R_s 相串联来代替,如图 1-1(c)所示。

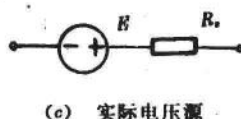
2. 电流源 理想电流源(恒流源)理解为:输出电流不变,输出电压可以变,电源内阻为



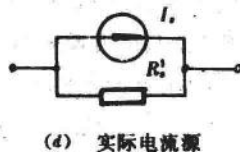
(a) 理想电压源



(b) 理想电流源



(c) 实际电压源



(d) 实际电流源

图 1-1 电压源和电流源

无穷大。在图 1-1(b) 中, I_s 为恒流源的输出电流, 箭头指向为电流方向。实际电流源, 其内阻不是无穷大, 输出电流随输出电压的升高而下降, 它可以用一个恒流源 I_s 和一个内阻 R_s 相并联来代替, 如图 1-1(c) 所示。

今后, 在未加说明的情况下, 电压源和电流源均指恒压源和恒流源。

3. 电压源和电流源的等效变换 等效变换指的是实际电源相互间进行变换, 变换前后对外电路应该是完全等效的, 即对外电路不发生任何影响。

在图 1-2 中, 电压源和电流源分别和相同的外电路(用 R 代替)相联接, 均令 R 两端的电压为 U , 流过 R 的电流为 I 。对于图 1-2(a) 中的电路有

$$U = E - R_s I \quad (1-1)$$

$$I = \frac{E - U}{R_s} = \frac{E}{R_s} - \frac{U}{R_s} \quad (1-2)$$

对于图 1-2(b) 中的电路有

$$I = I_s - \frac{U}{R_s'} \quad (1-3)$$

$$U = (I_s - I) R_s' = I_s R_s' - I R_s' \quad (1-4)$$

两个电源对 R 要等效, 则两个 U 应相等, 两个 I 应相等。将式(1-1)、(1-2)和式(1-3)、(1-4)进行比较, 可得出电源等效变换的条件为:

$$R_s = R_s' \quad (1-5)$$

$$I_s = E / R_s \quad (\text{即 } E = I_s R_s) \quad (1-6)$$

图 1-3 是实际电压源和实际电流源等效变换的例子。注意, 变换前后电压源和电流源的方向要一致, 即它们对外电路(R)应产生相同方向的电流和相同极性的电压降。

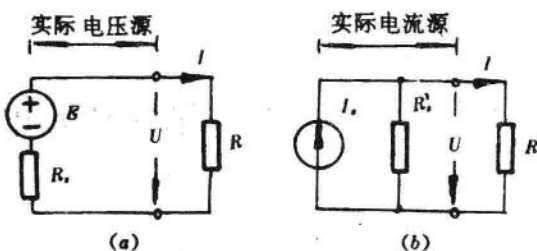


图 1-2 实际的电压源和电流源与 R 相联

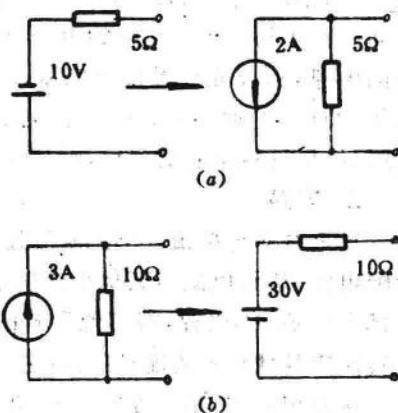


图 1-3

§ 1-2 电路的基本定律

一、有源支路欧姆定律 有源支路欧姆定律又称含源支路欧姆定律。图 1-4 中的电路有两个端点 a, b , 对于这样一个具有两个端点的电路, 也称为支路。支路中含有电源 E 、电阻 R , E, U_{ab}, I, R 四者间的关系由有源支路欧姆定律所定。在图中所假定的正方向条件下,

$$U_{ab} = -E + IR$$

$$\text{即 } I = \frac{U_{ab} + E}{R} \quad (1-7)$$

上式为有源支路欧姆定律。注意, 有源支路欧姆定律表达式完全是根据假定的电动势, 电压及电流正方向的条件写出的。 E, U_{ab} 与 I 的方向一致时, E, U_{ab} 取正值, 反之则取负值, 如图 1-4 所示。

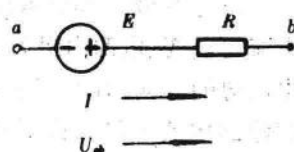


图 1-4 有源支路

二、基尔霍夫定律 基尔霍夫定律也称克希荷夫定律。运用欧姆定律仅能求解简单电路,对于复杂电路,则需要用基尔霍夫定律求解。

1. 节点和回路 三个或三个以上支路的联接点叫做节点。图 1-5 中的 a 和 c 两点都是节点。此电路共有两个节点。电路的支路是联在两个节点之间的。

电路中的任一闭合路线称为回路。图 1-5 中共有三个回路,即 $adcb$, $abcR_3a$, $adcR_3a$ 。一般把含元件较多的电路称为网络。实际上,电路和网络这两个名词并无明确的区别,一般可以混用。

2. 基尔霍夫第一定律——电流定律 电流定律的内容是:在任一时刻,流入一个节点的电流总和等于从这个节点流出的电流总和。

在图 1-6 中,按照电流定律有:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 \quad (1-8)$$

对于这个定律也可以换一种说法,即流入(或流出)节点的电流代数和恒等于零。这里若规定(相反规定也行),流出节点电流为正,流入节点电流为负,则式 1-8 可写成

$$-I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 = 0 \quad (1-9)$$

电流定律的一般表达式为

$$\sum I = 0 \quad (1-10)$$

即:在电路的任一节点上各支路电流的代数和等于零。基尔霍夫第一定律是说明电路中各部分电流间的相互关系的定律,是电流连续性的表现。

电流定律本来是运用于节点的,但也可推广用于电路中的任一假设的封闭面。例如,在图 1-7 中,对于虚线所示的封闭面所包围的电路来说,流入(或流出)该封闭面电流的代数和也恒等于零。即 $\sum I = 0$, 或 $I_1 + I_2 - I_3 = 0$

3. 基尔霍夫第二定律——电压定律 电压定律的内容是:在任一时刻,沿闭合回路一周,电压降的代数和恒等于零。例如,在图 1-8 所示的闭合回路中,各方框表示电阻或电压源,它们各自的两端存在着电压,电压极性如图中所示。如果从 a 点出发,沿顺时针方向绕行一周后又回到 a 点,则有

$$U_1 + U_2 + U_3 - U_4 - U_5 = 0$$

电压定律的一般表达式为

$$\sum U = 0 \quad (1-12)$$

在大多数情况下,电压定律常与欧姆定律联合运用,即将各段电路的电压降用电流、电阻和电动势来表示。例如,在图 1-9 中,对于回路 $abca$,按电压定律有

$$U_{ab} + U_{bc} + U_{ca} = 0$$

运用欧姆定律后,则上式为

$$(-I_1 R_1) + (-E_2 + I_2 R_2) + (E_3 - I_3 R_3) = 0$$

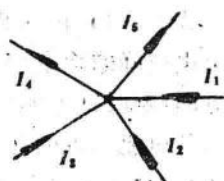


图 1-6

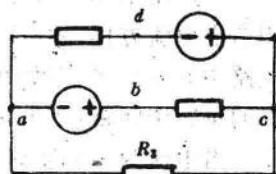


图 1-5

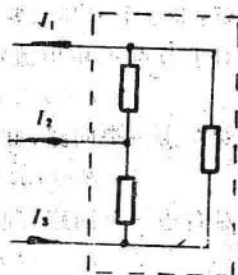


图 1-7

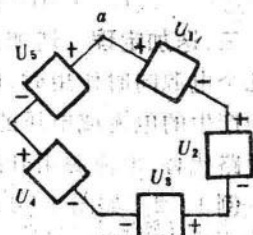


图 1-8

$$(1-11)$$

$$(1-12)$$

$$\text{即} \quad -I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 = E_2 - E_3 \quad (1-13)$$

$$\text{或} \quad \sum IR = \sum E \quad (1-14)$$

式(1-14)称为基尔霍夫第二定律。用文字叙述是:回路中电阻上电位降的代数和等于电动势(电位升)的代数和。当回路的绕行方向(顺时针方向或逆时针方向)选定后(如图1-9中的 $abca$ 绕向),凡电流正方向与绕行方向一致的(如 I_2),其电位降为正,反之则为负(如 I_1 和 I_3);凡电动势正方向与绕行方向一致的(如 E_2)为正,反之则为负(如 E_3)。

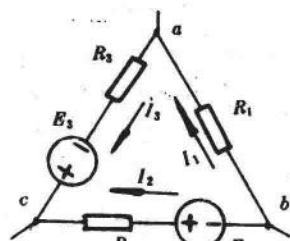


图 1-9

在应用基尔霍夫定律解题时,按照未知数的个数,应先尽量选用节点电流方程,然后以回路电压方程补足之。同时,还应注意所列方程的独立性。若一个电路中有 m 个节点,则可列 $(m-1)$ 个独立的节点电流方程;在列回路电压方程时,应使所选择的每一个回路,至少含有一段以前未曾选用过的支路。

当电流为未知量时,应先假设电流的方向;若计算结果电流为正值,说明实际电流方向与假设方向相同;为负值,则说明二者方向相反。

例 1-1 求图 1-10 中三条支路的电流 I_1 、 I_2 、 I_3 。

解:求三个未知数要列三个方程。图中,有一个独立的节点和两个独立的回路。

对于节点 a ,由电流定律得

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (1)$$

对左边一个回路,顺时针绕行一周,由电压定律得

$$-E_1 + I_1 R_1 + I_2 R_2 = 0 \quad (2)$$

对右边一个回路,顺时针绕行一周,由电压定律得

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 - E_2 = 0 \quad (3)$$

解方程组①②③,将已知数据代入方程组中,可得

$$I_1 = 1.51 \text{ A}, \quad I_2 = 0.34 \text{ A}, \quad I_3 = 1.17 \text{ A}$$

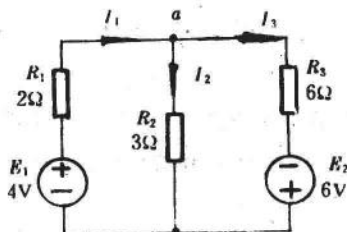


图 1-10

三、迭加定理 迭加定理只适用于线性电路。迭加定理是这样叙述的:在线性电路中,若有几个电源同时作用时,电路中任一条支路的电流或电压,等于各个电源单独作用时在该支路中产生的电流或电压的代数和。每个电源在单独作用时,其他的电源应为零值,即电压源用短路代替,电流源用开路代替。

例 1-2 如图 1-11 所示,求图 1-11(a)中 R_2 两端的电压。

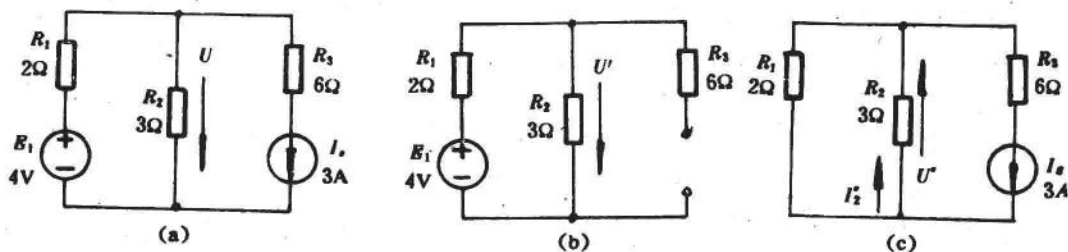


图 1-11

解:先求 E_1 单独作用时在 R_2 上产生的电压。为此, I_s 用开路代替,如图 1-11(b)所示。 E_1 只对 R_1 、 R_2 起作用,因此

$$U' = E_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 3 \times \frac{3}{2+3} = 2.4\text{V}$$

再求 I_s 单独作用时在 R_2 上产生的电压。为此, E_1 用短路代替, 如图 1-11(c) 所示。流过 R_2 的电流为

$$I' = I_s \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 3 \times \frac{2}{2+3} = 1.2\text{A}$$

$$U'' = I_2 \cdot R_2 = 1.2 \times 3 = 3.6\text{V}$$

因此, E_1 和 I_s 同时作用时, R_2 两端的电压按照图 1-11(a) 所示极性应为

$$U = U' - U'' = 2.4 - 3.6 = -1.2\text{V}$$

本题的电路原是复杂电路, 运用迭加原理可将其化为简单电路进行计算。计算结果为负值, 说明 R_2 两端的电压实际极性与所设定的极性相反, 即 R_2 的下端电位高于上端电位。

四、戴维南定理 戴维南定理又名代文宁定理。

任何网络, 只要它具有两个向外伸出的端点, 都叫做二端网络。如果它的内部有电源, 就叫做有源二端网络; 如果它的内部没有电源, 就叫做无源二端网络。

戴维南定理可叙述为: 一个有源二端网络, 就其外部特性而言, 总可以用一个等效电压源来代替, 这个等效电压源的电动势等于有源二端网络的开路电压, 其内阻等于当此有源二端网络内所有的电源均为零时(即电压源用短路代替, 电流源用开路代替), 从二端网络两个端点看进去的入端电阻(也称有源二端网络的输出电阻或戴维南电阻)。

运用戴维南定理解题的关键在于正确理解和求出有源二端网络的开路电压和入端电阻。只要将外电路断开, 求出有源二端网络在断开处的电压就是开路电压; 将有源二端网络内的所有电源视为零, 求出断开处的电阻就是入端电阻。

例 1-3 如图 1-12 所示, 用戴维南定理求图 1-12(a) 中的 R_2 两端的电压。

解: 先求开路电压 U_o 。将 R_2 断开, 如图 1-12(b) 所示, 因为 R_1 中有 $I_s = 3\text{A}$ 的电流流过, 根据有源支路欧姆定律得

$$\begin{aligned} U_{ab} = U_o &= -I_s R_1 + E_1 \\ &= -3 \times 2 + 4 = -2\text{V} \end{aligned}$$

再求入端电阻 E_1 用短路代替, I_s 以开路代替, 如图 1-12(c) 所示, 则由 a, b 端看进去的电阻 R_o 为

$$R_o = R_1 = 2\Omega$$

这样, 我们就求得了有源二端网络的等效电源, 得到如图 1-12(d) 所示电路, 求得 R_2 两端的电压

$$\begin{aligned} U &= U_o \cdot \frac{R_2}{R_o + R_2} \\ &= (-2) \times \frac{3}{2+3} = -1.2\text{V} \end{aligned}$$

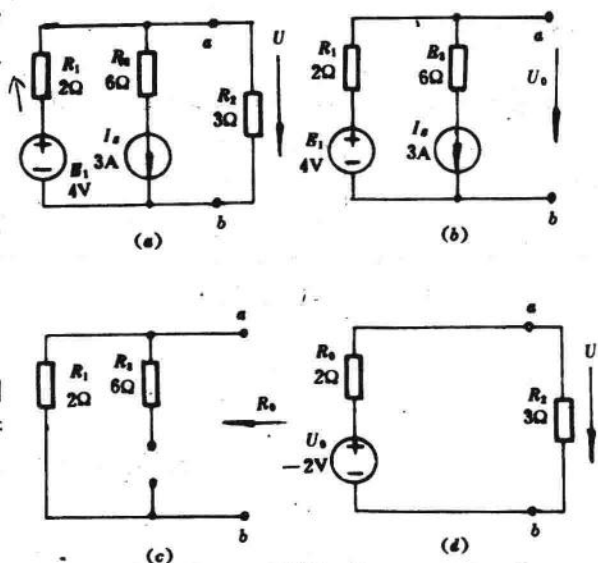


图 1-12

例 1-4 应用戴维南定理求图 1-13(a) 电路中流过 R_2 的电流 I_2 。

解: 先求开路电压 U_o 。从 a, b 处断开 R_2 , 如图 1-13(b) 所示, 由图中可看出

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_3} = \frac{4 + 6}{2 + 6} = 1.25 \text{ A}$$

根据有源支路欧姆定律得

$$U_{ab} = U_o = IR_3 - E_2 = 1.25 \times 6 - 6 = 1.5 \text{ V}$$

再求入端电阻 R_o 。将 E_1 、 E_2 分别用短路代替,如图 1-13(c)所示,由 a 、 b 看进去的电阻为

$$R_o = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = \frac{2 \times 6}{2 + 6} = 1.5 \Omega$$

这样,我们就求得了有源二端网络的等效电源,得到如图 1-13(d)所示的电路。于是可求得流过 R_2 的电流为

$$I_2 = \frac{U_o}{R_o + R_2} = \frac{1.5}{1.5 + 3} = 0.333 \text{ A}$$

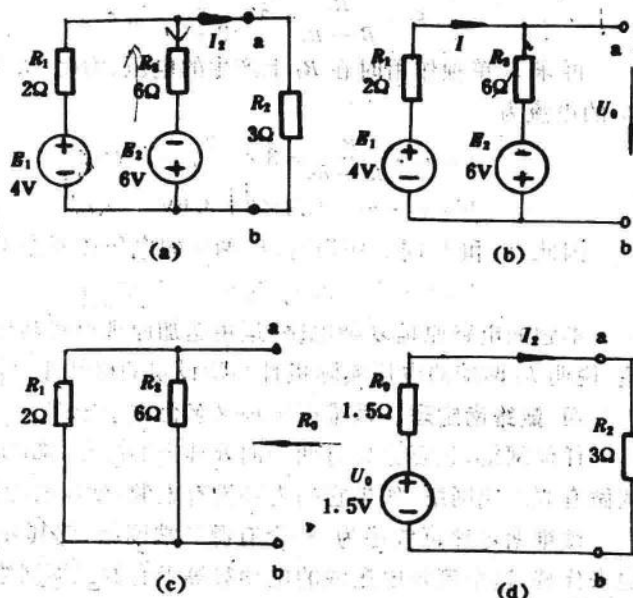


图 1-13

五、功率匹配定理 功率匹配定理又名最大功率输出定理。一个实际电源,它产生的总功率通常由两部分组成,即电源内阻所消耗的功率和输出到负载上的功率。在电子技术中,总是希望负载上得到的功率尽可能大。那么,怎样才能使负载从电源获得最大的功率呢?

设图 1-14 中电源的电动势为 E ,内阻为 R_s ,负载电阻为 R ,则

$$I = \frac{E}{R_s + R}$$

$$\text{负载功率为 } P = I^2 R = \left(\frac{E}{R_s + R} \right)^2 R$$

当负载 R 变化时,负载功率 P 的最大值发生在 $\frac{dP}{dR} = 0$ 之时,即

$$\frac{dP}{dR} = E^2 \frac{(R + R_s)^2 - 2R(R + R_s)}{(R + R_s)^4} = 0$$

$$\text{此时 } (R + R_s)^2 - 2R(R + R_s) = 0, \text{ 即 } R = R_s.$$

即是当负载电阻等于电源内阻时,负载上得到的功率最大。满足 $R = R_s$ 时,称为最大功率“匹配”,此时负载所得的最大功率为

$$P = \left(\frac{E}{R + R_s} \right)^2 R = \frac{E^2}{4R} = \frac{E^2}{4R_s} \quad (1-15)$$

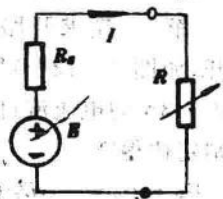


图 1-14

§ 1-3 正弦交流电路的稳态分析

如果电流的大小和方向都随时间而变化,这样的电流称为交变电流。同样也有交变电压和交变电动势。三者统简称为交流电。

交流电流所流过的电路叫做交流电路。随时间按正弦规律变化的交流电称为正弦交流电,其波形是正弦波;随时间不按正弦规律变化的交流电称为非正弦交流电或脉冲,它们的

波形是脉冲波,如矩形波、锯齿波、三角波等。

正弦电流可用下面的函数表示

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) = \sqrt{2} I \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (1-16)$$

由函数式可以看出正弦电流是周期性电流。式(1-16)中, $i(t)$ 为正弦电流在 t 时刻的数值,称为正弦电流的瞬时值; I_m 称为电流的幅值; ω 为电流的角频率,单位为弧度/秒; ωt 为旋转因子; t 为时间,单位为秒; φ 为初相位,单位为弧度或度; $(\omega t + \varphi)$ 为相位; I 为正弦电流的有效值; f 为电流的周频率,单位为周/秒。

正弦电压、正弦电动势的表达式与正弦电流的表达式相似,只须将电流的符号换成电压、电动势的符号,即

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi) = \sqrt{2} U \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (1-17)$$

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi) = \sqrt{2} E \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (1-18)$$

正弦交流电的幅值(或有效值),角频率(或频率)和初相位称为正弦交流电的三要素。正弦交流电除函数表示法外,还有曲线表示法、旋转矢量表示法和复数表示法。下面首先介绍在交流电路中十分有用的复数表示法。

一、复数的表示法 复数的表示如图 1-15 所示。横轴表示实轴,纵轴表示虚轴,虚数单位为 j 。若 A 为复数, r 为复数的模数,则 A 的表示法有:

$$\text{代数式} \quad A = a + jb. \quad (1-19)$$

$$\text{三角式} \quad A = r(\cos\varphi + j\sin\varphi) \quad (1-20)$$

$$\text{指数式} \quad A = r e^{j\varphi} \quad (1-21)$$

$$\text{相量式} \quad \text{相量 } \vec{OA} \text{ 表示复数 } A, \text{ 其模为 } r, \text{ 其幅角为 } \varphi$$

$$\text{极坐标式} \quad A = r \angle \varphi \quad (1-22)$$

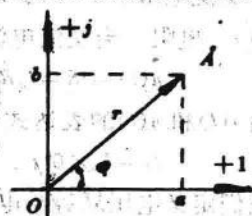


图 1-15

(1-22)式是复数在工程上、电工学中的一种简写形式, $r \angle \varphi$ 读作“ r 在一角度 φ ”。

图 1-15 中各量间的关系为:

$$a = r \cos \varphi$$

$$b = r \sin \varphi$$

$$r = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{a}$$

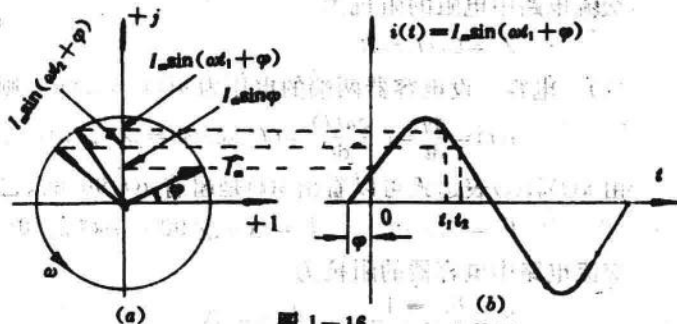


图 1-16

二、正弦交流电的复数表示法

图 1-16(a)表示了电流相量 $\vec{I}_m$ 以角速度 ω 逆时针方向

旋转时在虚轴上的投影,把它展开后得到如图 1-16(b)所示的正弦曲线,显然,它是符合于 $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ 的。

由图 1-16 可以看出,一个正弦函数能用一个相量来代替。这里提到的仅仅是代替,而不是相等。相量在虚轴上的投影是复数的虚部,而虚部又与正弦函数是相对应的,即

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) \leftrightarrow \vec{I}_m = I_m \cos \varphi + j I_m \sin \varphi$$

在上式中,正弦函数的瞬时值与复数的虚部仅差旋转因子 ωt 。因此,我们在进行代替、转换时,一定要注意把 ωt 考虑进去。这样,就能够把正弦函数较复杂的运算转换为较简单的复数运算,再将复数运算的结果转换为正弦函数,从而得到正弦函数的运算结果。

例 1-5 已知: $i_1(t) = 3\sin(\omega t + 90^\circ)$ (A), $i_2(t) = 4\sin(\omega t + 30^\circ)$ (A)。

求: $i_1(t) + i_2(t)$; $i_1(t) - i_2(t)$; $i_2(t) - i_1(t)$ 。

解: $i_1(t)$ 对应的复数为 $\dot{A}_1 = 3\angle 90^\circ = 3\cos 90^\circ + j3\sin 90^\circ = j3$

$i_2(t)$ 对应的复数为 $\dot{A}_2 = 4\angle 30^\circ = 4\cos 30^\circ + j4\sin 30^\circ = 3.46 + j2$

$$\dot{A}_1 + \dot{A}_2 = j3 + 3.46 + j2 = 3.46 + j5 = 6.08\angle 55^\circ 18'$$

$$\dot{A}_1 - \dot{A}_2 = j3 - 3.46 - j2 = -3.46 + j1 = 3.60\angle 163^\circ 53'$$

$$\dot{A}_2 - \dot{A}_1 = 3.46 + j2 - j3 = 3.46 - j1 = 3.60\angle -16^\circ 7'$$

将复数取虚部, 考虑到 ωt , 写成对应的正弦函数为:

$$i_1(t) + i_2(t) = 6.08\sin(\omega t + 55^\circ 18') \text{ (A)}$$

$$i_1(t) - i_2(t) = 3.60\sin(\omega t + 163^\circ 53') \text{ (A)}$$

$$i_2(t) - i_1(t) = 3.60\sin(\omega t - 16^\circ 7') \text{ (A)}$$

这里介绍的正弦函数用复数进行运算, 只限于频率相同的正弦函数间的运算, 而不能用于频率不同的正弦函数间的运算。

三、交流电路的复数法

1. 交流电路中单一元件的阻抗 单一元件是指纯电阻、纯电容和纯电感。

(1) 电阻 当交流电流 $i(t) = I_m \sin \omega t$ 流过电阻 R 时, R 两端的交流电压为

$$u(t) = iR = I_m R \sin \omega t.$$

由 $i(t)$ 和 $u(t)$ 的表达式可以看出 $i(t)$ 和 $u(t)$ 是同相位的, 它们所对应的复数分别为

$$\dot{I}_R = I_m \angle 0^\circ, \quad \dot{U}_R = I_m R \angle 0^\circ = R \dot{I}_R$$

我们定义电压复数与电流复数的比值为复数阻抗, 简称阻抗, 用 Z 表示, 即

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} \quad (1-23)$$

交流电路中电阻的阻抗为

$$Z_R = \dot{U}_R / \dot{I}_R = R \quad (1-24)$$

(2) 电容 设电容器两端的电压为 $u(t) = U_m \sin \omega t$, 则流过电容器的电流为

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{du(t)}{dt} = CU_m \omega \cos \omega t = \omega CU_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

由 $u(t)$, $i(t)$ 表达式可以看出 $i(t)$ 是超前 $u(t)$ 90° 的, 它们所对应的复数分别为

$$\dot{U}_C = U_m \angle 0^\circ, \quad \dot{I}_C = \omega CU_m \angle 90^\circ = j\omega CU_m \angle 0^\circ = j\omega C \dot{U}_C.$$

交流电路中电容器的阻抗为

$$Z_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{I}_C} = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C} = -jX_C \quad (1-25)$$

式中, $X_C = \frac{1}{\omega C}$ 称为电容器的容抗, 单位为欧姆。

(3) 电感 当交流电流流过电感线圈 L 时, 电感中就会有自感电动势 e_L 产生, 其值为 $e_L = -L \frac{di}{dt}$ 。为了克服电感的自感电动势, 加在电感 L 两端的电压必然与自感电动势相等且反向, 即 $u_L = -e_L = L di/dt$ 。

设流过电感的交流电流为 $i(t) = I_m \sin \omega t$, 则电感两端的电压为

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = \omega LI_m \cos \omega t = \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ).$$

由 $i(t)$, $u(t)$ 表达式可以看出 $u_L(t)$ 是超前 $i(t)$ 90° 的, 它们所对应的复数为

$$\dot{I}_L = I_m \angle 0^\circ, \quad \dot{U}_L = \omega L I_m \angle 90^\circ = j\omega L I_m \angle 0^\circ = j\omega L \dot{I}_L$$

在交流电路中,得到电感的阻抗为

$$Z_L = \frac{\dot{U}_L}{\dot{I}_L} = j\omega L = jX_L \quad (1-26)$$

式中, $X_L = \omega L$ 称为电感器的感抗,单位为欧姆。

2. 交流电路的复数法 交流电路一经用复数表示后,直流电路中的欧姆定律、基尔霍夫定律、电阻的串联和并联定理、分压定理和分流定理等,都可以用于交流电路中,其表达形式如下。

$$\text{阻抗串联定理} \quad Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots \quad (1-27)$$

$$\text{阻抗并联定理} \quad Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1-28)$$

$$\text{欧姆定律} \quad \dot{U} = IZ, \quad \dot{I} = \dot{U}/Z, \quad Z = \dot{U}/\dot{I} \quad (1-29)$$

$$\text{基尔霍夫第一定律} \quad \sum \dot{I} = 0 \quad (1-30)$$

$$\text{基尔霍夫第二定律} \quad \sum \dot{U} = 0 \quad (1-31)$$

例 1-6 在 R 、 L 、 C 串联的电路中,已知电阻 $R = 30\Omega$,电感 $L = 127\text{mH}$,电容 $C = 40\mu\text{F}$,电源电压 $u(t) = 220\sqrt{2}\sin(314t + 20^\circ)$ (V)。求:串联电路中的电流 $i(t)$ 。

解:先求出串联电路的复数总阻抗 Z ,再求复电流 $\dot{I}$,取 $\dot{I}$ 的虚部为 $i(t)$ 。

$$Z = Z_R + Z_L + Z_C = R + j\omega L + j\frac{1}{\omega C} = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (1-32)$$

代入数据后得

$$Z = 30 + j(314 \times 127 \times 10^{-3} - \frac{1}{314 \times 40 \times 10^{-6}}) = 30 - j40 = 50 \angle -53^\circ$$

$u(t)$ 对应的复数电压为 $\dot{U} = 220\sqrt{2} \angle 20^\circ$ 。

$$\text{故} \quad \dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{220\sqrt{2} \angle 20^\circ}{50 \angle -53^\circ} = 4.4\sqrt{2} \angle 73^\circ$$

$\dot{I}$ 取虚部,考虑到 ωt ,得出串联电路中的电流为:

$$i(t) = 4.4\sqrt{2}\sin(314t + 73^\circ) \quad (\text{A})$$

一般地, R 、 L 、 C 串联电路的阻抗可写为

$$Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R + j(X_L - X_C) = R + jX \quad (1-33)$$

式中的 X 称为电抗,它包含感抗和容抗两部分。当 $X = 0$,即

$X_L = X_C$ 时,电路呈电阻性,电流与电压同相位;当 $X > 0$,即 $X_L > X_C$ 时,电路呈电感性,电压超前电流;当 $X < 0$,即 $X_L < X_C$ 时,电路呈电容性,电流超前电压。阻抗 Z 包含电阻 R 和电抗 X ,阻抗的名称由此而来。 Z 、 R 、 X 之间的关系可组成一个三角形,称为阻抗三角形,如图 1-17 所示。

注意例 1-6 中的 $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{220\sqrt{2} \angle 20^\circ}{50 \angle -53^\circ} = 4.4\sqrt{2} \angle 73^\circ$,这里的 $4.4\sqrt{2}$, $220\sqrt{2}$,

50 分别是 $\dot{I}$ 、 $\dot{U}$ 、 Z 的模数(绝对值),即 $|\dot{I}| = 4.4\sqrt{2}\text{A}$, $|\dot{U}| = 220\sqrt{2}\text{V}$, $|Z| = 50\Omega$ 。

由这三个数据可得出这样的结论:在交流电路中,复数的模(有效值或幅值)是符合欧姆定律的,即

$$|\dot{U}| = |\dot{I}| \cdot |Z|, \quad \frac{|\dot{U}|}{\sqrt{2}} = \frac{|\dot{I}|}{\sqrt{2}} \cdot |Z|.$$

四、 R 、 L 、 C 谐振电路 掌握了前面的基础知识后,就容易理解电路的谐振原理。

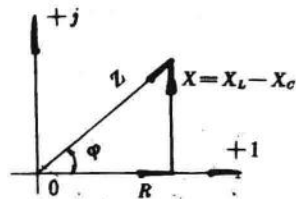


图 1-17