

高等医药院校教材

(供药学专业用)

物理学

下 册

庄 鸣 山 主 编

人民卫生出版社

高等医药院校教材

(供药学专业用)

物 理 学

下 册

(电工电子学基础部分)

庄 鸣 山 主 编

谷家骅 王鸿儒 编写
张文汉 李春琪

人 民 卫 生 出 版 社

内 容 提 要

本书分上下两册。上册为物理学基础理论，内容包括力学、振动和波、分子物理学、热力学、电磁学、光学和量子物理基础；下册为电工电子学，内容包括交流电路、晶体管的基本工作原理、晶体管放大器、正弦波振荡器、直流稳压电源和脉冲数字电路及传感器简介。

本书主要供高等医药院校药学专业使用，也可供其他专业，如生物系选用。

物 理 学

(下 册)

庄 鸣 山 主编

人民卫生出版社出版

(北京市崇文区天坛西里10号)

北京市房山县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米16开本 13 $\frac{3}{4}$ 印张 317千字

1985年11月第1版 1987年9月第1版第3次印刷

印数：11,101—13,620

ISBN 7-117-00006-6/R·7 定价：1.90元

统一书号：14048·5009

编写说明

全国高等医药院校试用教材供药学专业用的《物理学》于1978年出版以来，已有六年之久，经兄弟院校使用，许多教师以他们自己多年的教学经验，对该教材的逻辑性、系统性和深广度都提出了很多的宝贵意见和建议，我们谨向这些同志表示衷心的感谢！

1982年冬我们召开了一次编者会议，交流了教材使用情况和所存在的问题，决定在1978年出版的试用教材基础上，重新制定编写大纲，并根据1983年卫生部和国家医药管理局联合召开的南京编审会议所确定的原则，结合药学专业的特点，对教材作了新的安排。上册针对专业的需要适当地加强和提高物理学基础理论部分；下册针对电子和信息技术在四化建设中对药学研究和生产的迫切需要，将交流电路和电子学增加部分内容，合并成电工电子学基础部分，单独成册。这样，既不影响基础物理的教学，同时又加强了对电子学的学习。

本教材可供四年制和五年制药学专业使用，但鉴于四年制学时数较少，故对某些章节标有“*”记号，教师对这部分内容可根据专业要求和学生的具体情况，自行安排或删除不讲；部分具有参考性内容用小字排印，供学生自学。本书每章附有习题和部分答案。索引中作了中英名词对照。

本教材由庄鸣山、谷家骥、王鸿儒、张文汉、李春琪同志执笔。在编写过程中还得到秦怀强和奚才清同志的许多建议和帮助，在这里谨致以深切的感谢！

限于编者水平，书中错误和缺点在所难免，我们诚恳地希望使用本书的老师和同学们提出批评和指正！

编者

1984年6月

目 录 (下册)

第十四章 交流电路	1
§ 14-1 正弦交流电.....	1
§ 14-2 电阻、电感和电容的串联电路.....	3
§ 14-3 串联谐振.....	9
§ 14-4 电感与电容并联电路 并联谐振.....	12
§ 14-5 交流电桥.....	15
§ 14-6 三相交流电.....	18
§ 14-7 交流电的功率.....	23
§ 14-8 变压器.....	28
§ 14-9 异步电动机.....	35
§ 14-10 控制电动机.....	41
习题十四.....	47
第十五章 晶体管的基本工作原理	51
§ 15-1 半导体的导电特性.....	51
§ 15-2 晶体二极管.....	53
§ 15-3 稳压管.....	56
§ 15-4 晶体三极管.....	57
习题十五.....	65
第十六章 晶体管放大器	67
§ 16-1 单管低频放大器.....	67
§ 16-2 晶体管的等效电路分析法.....	73
§ 16-3 放大器静态工作点的稳定.....	79
§ 16-4 多级放大器.....	82
§ 16-5 场效应管放大器.....	87
§ 16-6 射极输出器.....	91
§ 16-7 功率放大器.....	98
§ 16-8 直流放大器.....	104
§ 16-9 运算放大器.....	114
习题十六.....	119
第十七章 正弦波振荡器	122
§ 17-1 LC 振荡器.....	122
§ 17-2 RC 振荡器.....	127
习题十七.....	131
第十八章 直流稳压电源	133
§ 18-1 整流电路.....	133

§ 18-2 滤波器	138
§ 18-3 稳压电路	142
§ 18-4 可控硅整流电路	150
习题十八	155
第十九章 脉冲数字电路	158
§ 19-1 脉冲的基本知识	158
§ 19-2 微分电路和积分电路	159
§ 19-3 晶体管的开关特性	160
§ 19-4 门电路	164
§ 19-5 与非门集成电路	170
§ 19-6 双稳态触发器	173
§ 19-7 RS 触发器	179
§ 19-8 单稳态触发器	181
§ 19-9 多谐振荡器	184
§ 19-10 电子计算机的基本原理	186
习题十九	193
第二十章 传感器简介	194
§ 20-1 绪言	194
§ 20-2 无源传感器	196
§ 20-3 有源传感器	201
习题二十	207
习题答案	208
索引	210

第十四章 交 流 电 路

在电工技术中所用的电压和电流一般都是时间的函数。按照电压和电流随时间变化的情况,大体上可以将它们分为有规则和不规则的两类。不规则的电压和电流随时间作无规律的变化。例如,由言语和音乐等信息转换而来的电压和电流总是比较杂乱,且带有随机性的。有规则的电压和电流是随时间,按一定的规律作周期性的和非周期性变化的,它们与时间之间有着确定的函数关系。表示这种函数关系的图形叫作电压和电流波形。最简单的电压和电流波形是直流电压和电流。因为它们的大小和方向是不随时间而变化的,所以它们的波形是与时间轴平行的直线。常用的交流电是指大小和方向都随时间作周期性变化的电压和电流。由于交流电随时间的变化是多种多样的,所以它们的波形也是多种多样的:有的随时间作正弦规律变化,是正弦交流电,它们的波形是正弦波;有的随时间不作正弦规律变化,是非正弦交流电,它们的波形统称为脉冲波,如矩形波、梯形波、锯齿波(见§19-1)等等都是。正弦交流电所流过的电路叫作交流电路。本章主要讨论正弦交流电路。

分析与计算直流电路的基本定律和基本方法也适用于交流电路,但由于交流电具有随时间变化的特点,因此产生了一系列区别于直流电路的特性,这一点应予以注意,否则容易引起错误。

§14-1 正弦交流电

从电磁感应现象知道,一个在均匀磁场内以恒定角速度转动的线圈中,将产生按时间正弦函数规律而变化的交变电动势

$$e = \mathcal{E}_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (14-1)$$

这种交流电叫作正弦交流电。式中, $\mathcal{E}_m$ 为电动势的最大值,叫作电动势的峰值, e 为电动势的瞬时值,它和时间 t 的关系如图14-1所示。式中, $\omega t + \varphi$ 叫作位相, ω 为角频率, φ 为初位相,交变电动势的大小和方向由峰值和位相共同决定。对于某一给定线圈,以一定的角速度在给定磁场中旋转时, $\mathcal{E}_m$ 是一个不变的量,因此交变电动势的瞬时值便完全由位相决定。设 f 和 T 分别为交流电的频

率和周期,则因 $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$, 式(14-1)

可改写成

$$\begin{aligned} e &= \mathcal{E}_m \sin(2\pi f t + \varphi) \\ &= \mathcal{E}_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi\right) \end{aligned} \quad (14-2)$$

当电动势为 $\mathcal{E}_m \sin(\omega t + \varphi)$ 的交流电源和电阻 R 组成一个闭合电路时,在电阻中就有电流通过。按欧姆定律,电路中的电流强度为

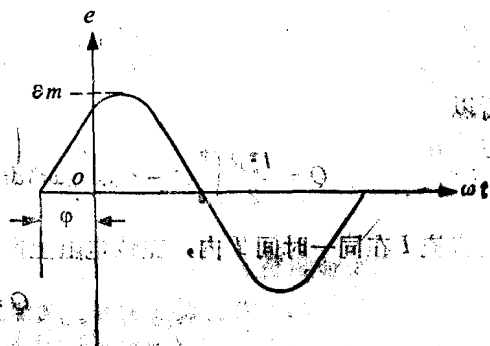


图14-1 正弦交变电动势波形图

$$i = \frac{e}{R} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \sin(\omega t + \varphi)$$

上式也可写成

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (14-3)$$

式中, $I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{R}$ 叫作**电流的峰值**。电路中的电流也是随时间作周期性变化的, 这样的电流叫作**交变电流**或**交流**。从式 (14-2) 和 (14-3) 可以看出, 在仅有电阻的电路中, 电流与电动势同相。

上述按正弦规律交变的电动势和电流都简称为正弦量。一个正弦量总有它的特征, 这种特征表现在正弦量的大小、交变快慢和初始值三方面, 而它们分别由峰值 (或有效值)、频率 (或周期) 和初位相来确定。所以**峰值、频率和初位相**叫作**确定正弦量的三要素**。不仅如此, 由于这些同频率的正弦量的初位相不同, 它们之间还存在着**位相差**, 这也是交流电和直流电之间质的区别之一。下面着重讨论正弦量的有效值和平均值。

在交流电中, 电动势的大小和电流的强度往往不是用它们的最大值, 而是用有效值来计量的。

什么是交流电的有效值? 简单地说, 如果交流电在某一电阻上一周期内所产生的热量, 是与一稳恒直流电在同一电阻上相同时间内所产生的热量相等, 则此稳恒直流电的大小就是交流电的**有效值**。例如, 某强度的交流 i 在一个周期内通过一电阻所产生的热量和 10 安的直流电流在相同时间内通过同一电阻所产生的热量相等, 那么**这个交流 i 的有效值就是 10 安**。又平常所用交流电压 220 伏, 也是指**交流电压的有效值**而言的。一般交流电测量仪器所量出的数值都是指交流电的有效值。现在根据热量相等的原则来计算按正弦形式变化的交流电流的有效值。在时间 dt 内, 交流 i 通过电阻 R 所产生的热量

$$dQ = i^2 R dt = I_m^2 R \sin^2 \omega t dt$$

则在一个周期 T 内产生的热量

$$Q = \int_0^T I_m^2 R \sin^2 \omega t dt$$

而其中

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t)$$

所以

$$Q = \frac{I_m^2 R}{2} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt = \frac{I_m^2 R}{2} \left(t - \frac{\sin 2\omega t}{2\omega} \right) \bigg|_0^T = \frac{I_m^2 RT}{2}$$

而直流 I 在同一时间 T 内, 在该电阻上产生的热量

$$Q = I^2 RT$$

根据有效值定义, 当以上两者的热量相等时, 这个直流 I 的数值就等于该交流 i 的有效值, 因此

$$I^2 RT = \frac{I_m^2 RT}{2}$$

所以有效值

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m \quad (14-4)$$

同理，我们可以得出交流电动势的有效值

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}} = 0.707 \mathcal{E}_m \quad (14-5)$$

在生产实践中，除了有效值外，有时也用平均值来表示交流电的大小。但在交流电路里，求电流的平均值是没有意义的，因为电流的值半周期为正，半周期为负，所以它在一个周期中的平均值必定等于零。然而在整流电路里交流电经整流后流过负载的是直流电流，因此在整流电路中（见第十八章）求平均值就有很大的用处。现在我们来求电流在半周期中的平均值（图 14-2）。假定有一个直流电流 I ，它流过某一电路，经过时间 $\frac{T}{2}$ 后，流过这个电路的电量 $q = I \times \frac{T}{2}$ （在图 14-2 中是横坐标轴、纵坐标轴 $i = I$ 和 $t = \frac{T}{2}$ 四根直线围成的矩形面积）。当交流电 $i = I_m \sin \omega t$ 流过这电路时，由图可知，

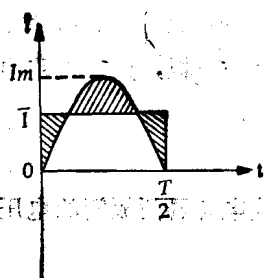


图 14-2 求交流电在半周期中的平均值用图

在同一时间内流过电路的电量 $q' = \int_0^{T/2} i dt$ 。如果电量 $q = q'$ ，那么这个直流 I 的数值就叫做该交流 i 在半周内的平均值。因

$$I \frac{T}{2} = \int_0^{T/2} i dt$$

所以

$$I = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m = 0.637 I_m \quad (14-6)$$

§ 14-2 电阻、电感和电容的串联电路

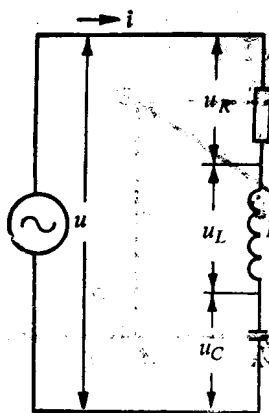


图 14-3 RLC 串联电路

在一个线圈和一个灯泡的电路中再串入一个电容器，接到交流电源两端，就组成一个 RLC 串联电路（图 14-3）。我们现在分析在这种电路中电流与电压的数量关系和位相关系。

我们知道，当交变电流通过仅有电阻的电路时，按欧姆定律，电阻两端的电压为

$$u_R = iR$$

而当通过仅有电感的线圈时，由于电流强度时刻地在变化，在电路中有自感电动势 e_L 产生，其值为

$$e_L = -L \frac{di}{dt}$$

为了克服线圈的自感电动势，外加线圈上的电动势，亦即线圈两端的电压 u_L ，在每一瞬时都必须与自感电动势相等相反，即

$$u_L = -e_L = L \frac{di}{dt}$$

当电容器的极板和一个交流电源连接在一起时，由于电容器反复充电和放电，电路中每一瞬时都有交变电流通过。设在时间 dt 内电容器上有电荷 dq 从一个极板沿着电路流向另一极板，则在电路中有电流

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}$$

故电容器两板间的电压为

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt$$

在RLC串联电路中，这三部分电压的瞬时值之和显然等于加在全部电路上的总电压的瞬时值 u ，即

$$u = u_R + u_L + u_c = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (14-7)$$

设以电流

$$i = I_m \sin \omega t \quad (14-8)$$

为参考量，则

$$u_R = iR = I_m R \sin \omega t = U_{Rm} \sin \omega t \quad (14-9)$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d}{dt} (I_m \sin \omega t) = I_m L \omega \cos \omega t = I_m X_L \cos \omega t = U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (14-10)$$

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{I_m}{C\omega} \cos \omega t = -I_m X_c \cos \omega t = U_{cm} \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (14-11)$$

它们都是正弦量，其中 X_L 和 X_c 都有类似电阻的性质，分别叫作电感的感抗和电容的容抗，单位都是欧姆。

与式(14-8)比较可知，在电阻 R 两端的电压 u_R 与电流 i 同相，在自感线圈 L 两端的电压 u_L 超前于电流 90° ，在电容器 C 两端的电压 u_c 落后于电流 90° 。

由于 u_R 、 u_L 和 u_c 都是同频率的正弦电压，但位相不同，计算它们的代数和，可以按照第三章§3-2中同周期谐振动合成的矢量图法。

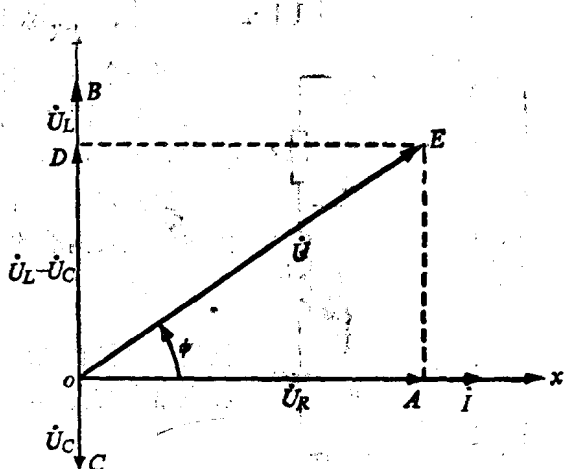


图 14-4 矢量图解法

图 14-4 表示 $u = u_R + u_L + u_C$ 的矢量图, 图中各矢量的大小都表示有效值, 并选定电流矢量 I 沿 Ox 轴正方向作为参考量。 $\overrightarrow{OA}$ 是电阻 R 两端的电压矢量 $\dot{U}_R$, 因它与 I 同相, 所以与矢量 I 重合。 $\overrightarrow{OB}$ 是线圈 L 的电压矢量 $\dot{U}_L$, 它比电流矢量 I 超前 90° , 所以是在与矢量 I 垂直的直线上方, 即在 Oy 轴正方向上。 $\overrightarrow{OC}$ 是电容器 C 上的电压矢量 $\dot{U}_C$, 因为它比电流矢量落后 90° , 所以是在矢量 $\dot{U}_L$ 的相反方向上, 即在 Oy 轴负方向上。 矢量 $\overrightarrow{OB}$ 和 $\overrightarrow{OC}$ 之和为 $\overrightarrow{OD}$, 其大小为线圈电压 $\dot{U}_L$ 与电容器上电压 $\dot{U}_C$ 的差值, 即 $\dot{U}_L - \dot{U}_C = I(X_L - X_C)$ 。 矢量 $\overrightarrow{OD}$ 与 $\overrightarrow{OA}$ 之和为 $\overrightarrow{OE}$, 它表示总电压矢量 $\dot{U}$, 亦即 $\dot{U}$ 的大小为

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

令

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (14-12)$$

则上式变成

$$U = IZ$$

或

$$I = \frac{U}{Z} \quad (14-13)$$

对于电流和电压的峰值来说, 则有

$$I_m = \frac{U_m}{Z} \quad (14-14)$$

式 (14-13) 是与直流电路的欧姆定律相类似, 可知 Z 有类似电阻的性质, 对交流电起阻碍作用, 这叫作电路的阻抗, 它包括电阻、感抗和容抗, 单位也是欧姆。式中 $X_L - X_C$ 叫作电抗, 以 X 表示, 即 $X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = X_L - X_C$ 。所以, 在串联电路中, 电流的有效值或峰值和电压的有效值或峰值成正比, 而和阻抗成反比。

在图 14-4 中, φ 就是总电压与电流之间的位相差角, 其值可由下式求出, 即

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{X}{R} \quad (14-15)$$

至于电压是超前还是落后于电流, 要由感抗和容抗的数值来决定。从上式可知, 如果 $X_L > X_C$, φ 角是正值, 则电压超前于电流, 电路呈电感性。反之, $X_L < X_C$, φ 角是负值, 则电压落后于电流, 电路呈电容性。如果 $X_L = X_C$, φ 角等于零, 则电压与电流同相, 电路呈电阻性。

1. RL 串联电路 在此电路中 $C = \infty$, 则

$$\left. \begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \\ I &= \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad \text{或} \quad I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \\ \varphi &= \operatorname{tg}^{-1} \frac{X_L}{R} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R} \end{aligned} \right\} \quad (14-16)$$

φ 是正值, 故电压超前于电流。

2. RC 串联电路 在此电路中 $L = 0$, 则

$$\left. \begin{aligned} z &= \sqrt{R^2 + X_c^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \\ I &= \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad \text{或} \quad I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \\ \varphi &= \tan^{-1}\left(-\frac{X_c}{R}\right) = \tan^{-1}\left(-\frac{1}{\omega CR}\right) \end{aligned} \right\} \quad (14-17)$$

φ 是负值, 故电压落后于电流。

对于仅有电阻、电容或电感的三种电路, 应用上述公式, 同样可以求出 z 、 I 和 φ , 这里不再赘述。但须注意, 在实际电路中, 总是同时具有电阻、电感和电容三个参数。但如果电感参数比较突出, 则忽略其他参数, 就可认为此电路是纯电感电路。

例题14-1 为了使一只 6.3 伏、0.3 安的小灯泡, 接在电压为 220 伏、频率为 50 赫的电源上能正常工作, 问应串联一只多大电容的电容器?

解 设 C 为串联电容, R 为小灯泡工作时的电阻, 则串联后电路的阻抗为

$$z = \sqrt{R^2 + X_c^2} = \frac{U}{I} = \frac{220}{0.3} = 733 \text{ 欧}$$

由此得

$$X_c = \sqrt{z^2 - R^2} = \sqrt{733^2 - R^2}$$

而

$$R = \frac{U_L}{I} = \frac{6.3}{0.3} = 21 \text{ 欧}$$

代入上式, 得

$$X_c = \sqrt{733^2 - 21^2} = 732 \text{ 欧}$$

所以

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 732} = 4.3 \times 10^{-6} \text{ 法} = 4.3 \text{ 微法}$$

例题14-2 图 14-5 为电子线路中的常用串联电路,

已知电源的频率 $f = 800$ 赫, 电容 $C = 0.047$ 微法, 电阻 $R = 2500$ 欧, 试求输出电压与输入电压的位相差。

解 输出电压 u_{sc} 就是电阻 R 两端的电压, 而它又是与电流同位相的, 因此算出电流与输入电压 u_{sr} 之间的位相差, 也就是 u_{sc} 与 u_{sr} 的位相差。应用

$$\begin{aligned} \tan \varphi &= -\left(\frac{X_c}{R}\right) = -\frac{1}{2\pi f CR} \\ &= -\frac{1}{2\pi \times 800 \times 0.047 \times 10^{-6} \times 2500} = -1.693 \end{aligned}$$

$$\varphi \approx -60^\circ$$

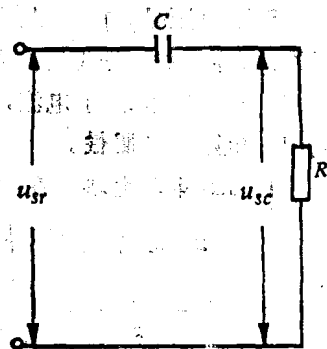


图 14-5

即输出电压超前于输入电压 60° 。由此可知, RC 串联电路可使电压的位相产生偏移, 因此这是一种移相电路, 常用在电子线路中。

*3. 交流电的复数表示法 由于交流电压与交流电流之间存在着一定的位相差, 在计算过程中采用复数有很大的方便。以正弦电流为例, 设电流的瞬时值 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, 用对应的复数指数表示时, 令复数的模等于正弦量的峰值, 复数的复角等于正弦量的位相角 $\omega t + \varphi$, 即

$$\dot{i} = I_m e^{j(\omega t + \varphi)} = \sqrt{\frac{2}{2}} I e^{j(\omega t + \varphi)} \quad (14-18)$$

上式也可写成

$$\dot{i} = \dot{I}_m e^{j\omega t} = \sqrt{\frac{2}{2}} \dot{I} e^{j\omega t} \quad (14-19)$$

其中

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\omega t} \quad (14-20)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = I e^{j\omega t} \quad (14-21)$$

$\dot{I}_m$ 与 $\dot{I}$ 分别叫作复数峰值和复数有效值。因此, 在仅有电阻的电路中, $u_R = iR$, 其复数式为 $\dot{u}_R = \dot{i}R$, 把它换为复数有效值,

$$\dot{U}_R = \dot{I}R \quad (14-22)$$

在仅有电感的电路中, $u_L = L \frac{di}{dt}$, 其复数式为

$$\dot{u}_L = L \frac{d\dot{i}}{dt} = L j \omega \sqrt{\frac{2}{2}} \dot{I} e^{j(\omega t + \varphi)} = L j \omega \dot{i} = j X_L \dot{i}$$

把上式换成复数有效值,

$$\dot{U}_L = j X_L \dot{I} \quad (14-23)$$

在仅有电容的电路中, $u_C = -\frac{1}{C} \int i dt$, 其复数式为

$$\dot{u}_C = -\frac{1}{C} \int \dot{i} dt = \frac{1}{j C \omega} \sqrt{\frac{2}{2}} \dot{I} e^{j(\omega t + \varphi)} = \frac{\dot{i}}{j C \omega} = -j X_C \dot{i}$$

把上式换成复数有效值

$$\dot{U}_C = -j X_C \dot{I} \quad (14-24)$$

故在 RLC 串联电路中总电压 $\dot{U}$ 为

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I}R + j \dot{I}X_L - j \dot{I}X_C \\ &= \dot{I} [R + j(X_L - X_C)] = \dot{I}(R + jX) \end{aligned}$$

则

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R + jX \quad (14-25)$$

我们用大写 Z 表示复数电压和复数电流之比, 即

$$\underline{Z} = R + jX \quad (14-26)$$

它的指数表示式为

$$Z = z e^{j\varphi} \quad (14-27)$$

我们把 Z 叫作复阻抗，其模和幅角分别为

$$z = |Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}$$

可见，用复数法求得的阻抗与用上述其他方法相同。

有了复阻抗，我们把式 (14-25) 可以写成

$$\underline{U} = \underline{I} Z \quad (14-28)$$

这就是复数交流欧姆定律。它与直流电路的欧姆定律 $U = RI$ 形式上很相似，所不同的是，复数交流欧姆定律公式中各个量都是复数。此外，需要注意的是，交流欧姆定律中的三个量虽然都是复数，但它们的意义不同。 $\underline{U}$ 和 $\underline{I}$ 是与电压和电流的正弦量相对应的复数，而复数阻抗本身不相对应于任何正弦量，只是通过它表示 $\underline{U}$ 和 $\underline{I}$ 的大小关系和位相关系。为了与 $\underline{U}$ 和 $\underline{I}$ 有所区别，我们用不加点的大写字母 Z 来表示。

利用了复数表示法，不仅可以得到与直流电路相类似的交流欧姆定律，而且对于串联和并联电路，也可以得到相类似的等效复阻抗公式，读者可自行证明。

交流电路中电压与电流的关系（大小和位相）有一定的规律，是容易掌握的。为了帮助读者总结和记忆，我们将各种交流电路中电压与电流的关系列入表 14-1 中。

表 14-1 各种交流电路中电压与电流的关系

电路	一般关系式	位相关系	大小关系	复数式
R	$u_R = iR$	 $\varphi = 0$	$I = \frac{U_R}{R}$	$I = \frac{\underline{U}_R}{R}$
L	$u_L = L \frac{di}{dt}$	 $\varphi = +90^\circ$	$I = \frac{U_L}{X_L}$	$I = \frac{\underline{U}_L}{jX_L}$
C	$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$	 $\varphi = -90^\circ$	$I = \frac{U_C}{X_C}$	$I = \frac{\underline{U}_C}{-jX_C}$
RL 串联	$u = iR + L \frac{di}{dt}$	 $\varphi > 0$	$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$	$I = \frac{\underline{U}}{R + jX_L}$
RC 串联	$u = iR + \frac{1}{C} \int i dt$	 $\varphi < 0$	$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$	$I = \frac{\underline{U}}{R - jX_C}$
RLC 串联	$u = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$	 $\varphi \begin{matrix} > \\ = \\ < \end{matrix} 0$	$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}$	$I = \frac{\underline{U}}{R + j(X_L - X_C)}$

例题 14-3 已知 RLC 串联电路上的电阻为 5 欧, 电感为 150 毫亨, 电容为 100 微法, 电源电压为 220 伏, 频率为 50 赫, 求总阻抗和电流的瞬时值。

解 因为 RLC 三者串联, 所以总阻抗为

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3$$

而

$$Z_1 = R, \quad Z_2 = j\omega L, \quad Z_3 = -\frac{j}{\omega C}$$

所以

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

$$|Z| = z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = 16.1 \text{ 欧}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = 71.9^\circ$$

即

$$Z = 16.1e^{j71.9^\circ} \text{ 欧}$$

应用欧姆定律, 得

$$I = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{220e^{j0^\circ}}{16.1e^{j71.9^\circ}} = 13.66e^{-j71.9^\circ} \text{ 安}$$

它的瞬时值为

$$i = 13.66\sqrt{2} \sin(\omega t - 71.9^\circ) \text{ 安}$$

§ 14-3 串联谐振

在上节所述 RLC 串联电路中, 当 $X_L = X_C$ 时总电压与电流同相, 阻抗 z 将为一纯电阻 R 。电路处于这种状态叫作**串联谐振**。

谐振现象一方面在现代电子技术和电工技术中得到极为广泛的应用; 另一方面, 在有些情况下, 谐振现象的出现可能危及系统正常工作。所以对谐振现象的研究是有很重要的实际意义的。下面我们来分析串联谐振时电路所具有的特征。

1. 谐振频率 当电路谐振时, $X_L = X_C$, 即 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 。由此得

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \\ f_0 &= \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \end{aligned} \right\} \quad (14-29)$$

式中, ω_0 叫作谐振电路的**固有角频率**, f_0 叫作谐振电路的**固有频率**, 它们是由电路本身的参数 L 和 C 来决定的。每一个 RLC 串联电路只有一个对应的谐振频率, 要达到谐振有两种方法:

- ① 电路的参数 L 和 C 不变, 改变外加电压的频率, 使与电路的固有频率相等;
 ② 外加电压的频率一定, 改变电路的 L 或 C 的大小, 使电路的固有频率等于外加电压的频率, 如收音机的接收回路就是利用改变电容 C 来达到它与某一电台的频率发生谐振的。

2. 谐振时电路的阻抗和电流 谐振时电路的阻抗

$$z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$$

电流

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{R} = I_0 \quad (14-30)$$

式中, I_0 表示谐振电流, 因 z 为最小, 故谐振时的电流为最大。

3. 谐振时电感和电容上的电压 串联谐振时, 线圈两端的电压与电容器两极板间的电压相等, 并有 180° 的位相差, 故互相抵消, 对整个电路不起作用。因此电阻两端的电压等于电源电压。但如果 $X_L = X_C \gg R$, 则每一电抗元件的电压可以大大地超过电源电压。这种分电压大于总电压, 只有在谐振电路中才能出现。因此, 串联谐振也叫作电压谐振。谐振时线圈与电容器的端电压分别为

$$U_L = I_0 X_L \text{ 和 } U_C = I_0 X_C$$

二者大小相等。又 $I_0 = \frac{U}{R}$, 故得

$$U_L = U_C = U \frac{X_L}{R} = U \frac{X_C}{R} = ;$$

由此可见, 线圈和电容的端电压都是电源电压的 $\frac{X_L}{R}$ 倍, $\frac{X_L}{R}$ 叫作电路的品质因数, 用 Q 来表示, 即

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f_0 L}{R} \quad (14-31)$$

Q 值在电子技术中是一个重要的物理量, 它的数值一般可达几十到几百。

例题 14-4 将一具有电感 $L = 160$ 毫亨、电阻 $R = 2$ 欧的线圈与一只电容 $C = 64$ 微法的电容器串联后接到电压 $U = 220$ 伏的交流电源上。试计算, (a) 谐振时电路的电流和电容器两端的电压; (b) Q 值。

解 (a) 谐振时, 电路中的电流达到最大值

$$I_0 = \frac{U}{R} = \frac{220}{2} = 110 \text{ 安}$$

频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{160 \times 10^{-3} \times 64 \times 10^{-6}}} = 50 \text{ 赫}$$

所以电容器两端的电压

$$U_C = I_0 X_C = 110 \times \frac{1}{2\pi \times 50 \times 64 \times 10^{-6}} = 5500 \text{ 伏}$$

$$(b) \quad Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi \times 50 \times 160 \times 10^{-3}}{2} = \frac{50}{2} = 25$$

可见，这时电容器两端的电压为电源电压的 25 倍。这样高的电压已远远超过电容器所允许的最高电压，可能将它击穿。因此在电力工程中必须避免这种谐振。

4. 谐振曲线 由于 RLC 串联电路上的电流是频率的函数，因此电流在不同频率下有不同的值。如以电流的有效值 I 为纵坐标，频率 f 为横坐标，就可得到电路中的电流随频率变化的曲线（图 14-6）。当电源频率等于电路固有谐振频率时，电流具有最大值。这条曲线通常叫作**电流谐振曲线**。下面讨论电流谐振曲线的形状与电路品质因数的关系。

由谐振时电流最大值

$$I_0 = \frac{U}{R}$$

和在一般情况时电流

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}$$

得

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{1 + [\frac{1}{R} (\omega L - \frac{1}{\omega C})]^2}}$$

即

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + [\frac{1}{R} (\omega L - \frac{1}{\omega C})]^2}}$$

由于

$$\frac{\omega L}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} \frac{\omega}{\omega_0} = Q \frac{\omega}{\omega_0} = Q \frac{f}{f_0} \quad \frac{1}{\omega RC} = \frac{1}{\omega_0 RC} \frac{\omega_0}{\omega} = Q \frac{f_0}{f}$$

所以

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 (\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f})^2}} \quad (14-32)$$

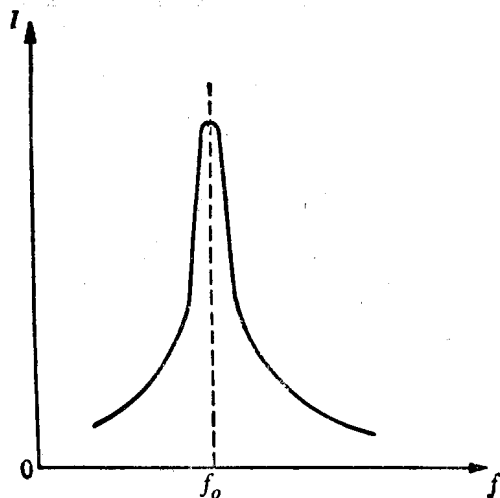


图 14-6 电流谐振曲线