

职业技能鉴定培训教材

高级 制冷设备 维修工

家电类职业技能鉴定培训教材编委会 组编
山东省家用电器职业技能鉴定所

GAO JI
ZHILENGSHEBEI
WEIXIUGONG



机械工业出版社
China Machine Press

职业技能鉴定培训教材

高级制冷设备维修工

家电类职业技能鉴定培训教材编委会 组编
山东省家用电器职业技能鉴定所

邢振禧 主编

罗南春 李增足 张瑞菊 栾欣 韩继武 编



机械工业出版社

本书是职业技能鉴定培训教材之一,是“高级制冷设备维修工”的技能鉴定教材。

本书介绍了电工电子基础知识、制图的基础知识、空调的原理和制冷循环的基本理论、中央空调、冷库的调试和操作管理,对微电脑空调器和变频空调器进行了电路分析,对汽车空调和经营管理也作了介绍。

本书突出职业技术教育的特点,也可作为中等职业学校制冷与空调专业教学用书和制冷空调行业维修人员岗位培训教材及自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

高级制冷设备维修工/家电类职业技能鉴定培训教材
编委会,山东省家用电器职业技能鉴定所组编. —北京:
机械工业出版社, 2001. 4
职业技能鉴定培训教材
ISBN 7-111-08772-0

I. 高… II. ①家…②山… III. 制冷—设备—维
修—职业技能鉴定—教材 IV. TB657

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 08658 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑:王 龙 版式设计:张世琴 责任校对:程俊巧
封面设计:方 芬 责任印制:郭景龙
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2001 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm×1092mm^{1/16}·25.5 印张·1 插页·635 千字
0 001—4 000 册
定价:40.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

家电类职业技能鉴定培训教材编委会

顾 问：	李 奇	机械工业出版社	副社长
	刘金良	国家轻工业局人才培训中心	常务副主任
	徐本高	山东省家用电器行业协会	理事长
主 任：	李佩禹	山东省家用电器职业技能鉴定所	所长
	范兴国	机械工业出版社电工电子编辑室	主任
	宋术山	海尔集团顾客服务事业部	部长
副主任：	姜亚彬	海尔集团冰箱顾客服务事业部	部长
	王海东	小鸭集团销售公司人力资源中心	主任
	苗 滨	山东省商业职业技术学院工程系	主任
委 员：	陈国华	机械工业出版社	编审
	于晓平	济南教育学院	副教授
	尹选模	山东省商业职业技术学院	高级讲师
	许 华	山东省家用电器职业技能鉴定所	工程师
	刘 伟	海尔集团顾客服务事业部技术部	工程师
	陶登涛	小鸭集团人力资源培训中心	工程师
	邢振禧	山东省商业职业技术学院	高级讲师
	齐运州	山东济南百大集团公司	工程师
	张新芝	山东省商业职业技术学院	高级讲师
	周兴前	山东大禹学院	讲师
	胡玉叶	山东省淄博商业学校	高级讲师
	谭桂峰	济宁工业学校	讲师
	姜宝港	山东省商业职业技术学院	讲师

序 言

《中华人民共和国劳动法》明确规定：国家对规定的职业制定职业技能标准，实行职业资格证书制度，由经过政府批准的考核鉴定机构负责对劳动者实施职业技能鉴定。

职业技能鉴定是提高劳动者素质，增强劳动者就业能力的有效措施，进行考核鉴定，并通过职业资格证书制度予以确认，为企业合理使用劳动力以及劳动者自主择业提供了依据和凭证。

目前，国家公布了实行就业准入的 90 个工种目录，其中家用电器产品维修工（包括：制冷设备维修工、家用电热器具与电动器具维修工）和家用电子产品维修工（包括：家用视频设备维修工、家用音频设备维修工）为实行就业准入的范围。

国家劳动部 2000 年第 6 号令明确规定：技工学校、职业（技术）学校、就业训练中心及各类职业培训机构的毕（结）业生，必须取得相应职业资格证书后，才能到技术工种岗位就业；对从事技术工种的学徒，用人单位应按照国家《工种分类目录》所规定的学徒期进行培训；对转岗从事技术工种的劳动者，用人单位应按照国家职业（技能）标准的要求进行培训，达到相应职业技能要求后再上岗。

实施职业技能鉴定，教材建设是重要的一环。为适应职业技能鉴定的迫切需要，推动职业培训教学改革，提高培训质量，根据“国家职业技能鉴定规范”的要求，参照目前职业技能考核鉴定办法和考核鉴定内容，我们组织家用电器维修专业相关工种的专家和考评员编写这套职业技能鉴定培训教材。考虑到教材的实用性和针对性，邀请了名牌家电生产企业参加编写工作。

这套培训教材，以“国家职业技能鉴定规范”为依据，编写内容限定在工种考核鉴定范围内。考虑到“国家职业技能鉴定规范”会根据技术和产品的发展不断修改，工种考核内容也相应地应不断更新，这套培训教材对本工种的新技术、新产品进行了较为详细的介绍。

为便于各职业学校和培训单位组织教学，同时照顾到申请参加职业技能鉴定人员自学和复习使用。本套培训教材对每一工种分别按初、中、高三个等级编写，独立成册，具有很强的实用性和针对性。

家电类职业技能鉴定培训教材共包括以下 9 种：

1. 初级制冷设备维修工
2. 中级制冷设备维修工
3. 高级制冷设备维修工
4. 初级家用电热器具与电动器具维修工
5. 中级家用电热器具与电动器具维修工
6. 高级家用电热器具与电动器具维修工
7. 初级家用电子产品（视频、音频设备）维修工
8. 中级家用电子产品（视频、音频设备）维修工
9. 高级家用电子产品（视频、音频设备）维修工

参加本套培训教材编写工作的单位有：青岛海尔集团、山东小鸭集团、青岛澳柯玛集团、山东省商业职业技术学院、淄博商业学校、山东省电子学校、临沂工业学校、滨州经济学校、潍坊贸易学校、潍坊经济学校、淄博工业学校、山东大禹学院、聊城建设学校、山东省公安学校、济宁市工业学校、济南教育学院、德州财贸经济学校、济南铁路机械学校等。

为便于读者应考，在书后附有近期使用过的国家题库统一鉴定试卷，为读者应考提供复习参考。

由于时间仓促，不足之处在所难免，欢迎各使用单位和个人提出宝贵意见和建议。

家电类职业技能鉴定培训教材编委会

2000年6月

前 言

为适应职业技能鉴定的迫切需要，统一鉴定水平，推动职业培训教学改革，提高培训质量，由机械工业出版社和山东省家用电器职业技能鉴定所组织有关教学、维修管理人员编写了这套职业技能鉴定系列丛书。

本书是这套职业技能鉴定系列丛书之一，是高级制冷设备维修工的技能鉴定教材。它依据国家职业技能鉴定规范对高级制冷设备维修工的知识和技能的具体要求组织内容，并补充了近年来制冷与空调技术发展的新内容，使其更具有实用性。

本书内容安排了电工电子基础知识、制图的基础知识、空调的原理和制冷循环的基本理论。在此基础上，介绍了中央空调和冷库的调试和操作管理，对微电脑空调器和变频空调器进行了电路分析，对汽车空调器和经营管理也作了介绍。本书有助于各级鉴定机构组织升级考核复习和申请参加技能鉴定的人员自学使用，对于各类职业技术学校师生、制冷空调行业的技术人员均有重要的参考价值。

本书由山东商业职业技术学院邢振禧任主编。具体编写分工如下：济南铁路机械学校李增足编写第一、二章；山东商业职业技术学院张瑞菊编写第三章；山东商业职业技术学院邢振禧编写第四、六（第一节除外）、七、九、十章；山东建筑工程学院罗南春编写第五、八章；山东省机电设备集团总公司空调销售公司韩继武编写第六章的第一节；山东省鲁商冰轮建筑设计有限公司栾欣编写第十一章。

限于编著者的水平，书中错漏不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

目 录

序言 前言

第一章 电工电子学知识 1

- 第一节 正弦交流电 1
- 第二节 正弦波的加减运算 4
- 第三节 正弦交流电路分析 6
- 第四节 谐振电路 11
- 第五节 正弦波振荡器 13
- 第六节 晶闸管的工作原理
与应用 15
- 第七节 示波器的使用与
检修知识 18
- 第八节 兆欧表的调整与检修 20
- 第九节 钳形电流表使用维护
与检修 23
- 复习题 24

第二章 数字电路基础 27

- 第一节 数字电路概述 27
- 第二节 基本逻辑门 29
- 第三节 复合逻辑门 34
- 第四节 触发器 36
- 第五节 计数器 40
- 第六节 译码器与数码显示器 45
- 第七节 寄存器与存储器 49
- 第八节 模拟量和数字量的
相互转化 51
- 第九节 数字多用表原理及
故障排除 53
- 复习题 58

第三章 机械图 60

- 第一节 视图 60

- 第二节 零件图 67
- 第三节 装配图 75
- 复习题 81

第四章 蒸气压缩式制冷循环 84

- 第一节 逆卡诺循环——理想
制冷循环 84
- 第二节 单级蒸气压缩式制冷的
理论循环 87
- 第三节 单级蒸气压缩式制冷的
实际循环 94
- 第四节 双级压缩与复叠式
制冷循环 109
- 复习题 127

第五章 空气调节原理 129

- 第一节 湿空气的物理性质 129
- 第二节 湿空气的焓湿图
及其应用 131
- 第三节 空调负荷 135
- 第四节 送风状态及送风量
的确定 140
- 复习题 142

第六章 微电脑空调器与变频 空调器 144

- 第一节 微电脑空调器 144
- 第二节 变频空调器 161
- 第三节 房间空调器的性能
检测 173
- 复习题 176

第七章 汽车空调系统	178
第一节 汽车空调系统的特点	178
第二节 汽车空调系统及 主要部件	178
第三节 汽车空调的控制系统	186
第四节 汽车空调系统的故障分析 和检修	190
复习题	194
第八章 中央空调系统	195
第一节 空调系统概述	195
第二节 空气处理设备	197
第三节 普通集中式空调系统	201
第四节 变风量空调系统	214
第五节 风机盘管空调系统	217
第六节 风道及气流组织	222
第七节 冷水机组与制冷机房	228
第八节 空调的调试	236
第九节 空调系统的运行管理	240
复习题	246
第九章 食品冷藏库	248
第一节 食品冷藏保鲜的基础 知识	248
第二节 冷库的冷负荷计算	256
第三节 氨冷库制冷系统	272
第四节 氟利昂冷库制冷系统	284
第五节 组合式冷库	296
第六节 果蔬气调冷库	299
复习题	304
第十章 制冷系统的调试与操作 管理	306
第一节 制冷压缩机的调试	306
第二节 制冷系统吹污与气密性 试验	310
第三节 制冷剂的充注与取出	312
第四节 制冷压缩机的负荷试运转、	

冷库的降温与验收 投产	317
第五节 制冷压缩机的操作 管理	319
第六节 制冷系统与设备的操作 调整	327
第七节 制冷系统的故障分析 与排除	349
复习题	360
第十一章 经营管理知识	362
第一节 组织管理	362
第二节 经营管理	363
第三节 质量管理	363
第四节 安全管理	367
复习题	368
附录	369
附录 A 模拟试卷与答案	369
附录 B 常用图表	375
附表 B-1 NH ₃ 饱和液体及蒸气的热力 性质	375
附表 B-2 R12 饱和液体及蒸气的热力 性质	377
附表 B-3 R22 饱和液体及蒸气的热力 性质	379
附表 B-4 R134a 饱和状态下的热力 性质表	382
附表 B-5 湿空气的密度、水蒸气压力、 含湿量和焓	385
附表 B-6 食品焓值	387
附表 B-7 蔬菜水果的呼吸热 q	389
附表 B-8 食品的主要物理特性	390
附表 B-9 氯化钠、氯化钙盐水 性能表	391
附图 B-1 NH ₃ 的 $\lg p-h$ 图	392
附图 B-2 R12 的 $\lg p-h$ 图	393
附图 B-3 R22 的 $\lg p-h$ 图	394
附图 B-4 R134a 的 $\lg p-h$ 图	395
附图 B-5 湿空气焓湿图	396
参考文献	397

第一章 电工电子学知识

内容提要：通过对本章内容的学习，要求掌握正弦交流电的两种表示法；熟练掌握用旋转矢量法对正弦交流电进行加减运算；掌握电阻、电感和电容串、并联电路的特点与应用计算；理解并掌握视在功率、有功功率、无功功率三个概念；理解功率因数的含义及提高电路功率因数的途径及意义；掌握谐振（振荡）电路的组成、种类、谐振（振荡）原理及谐振（振荡）电路的实际应用；掌握晶闸管的构造、特性、应用与保护；了解晶闸管的触发电路及工作原理；掌握示波器、兆欧表、钳形电流表的使用与检修知识。

第一节 正弦交流电

一、概念

大小和方向都随时间作周期性变化且平均值为零的电动势、电压和电流统称为交流电。交流电的变化规律可以有多种形式，但使用最普遍、应用最广泛的是按正弦规律变化的交流电，即所谓正弦交流电。

二、正弦交流电的图示

由于交流电的方向是变化的，故在电路图上标出的电流方向为假定电流的正方向。当实际方向和假定正方向一致时，电流值为正；反之为负。在直角坐标系中，若以 x 轴表示时间， y 轴表示正弦量，则正弦交流电随时间的变化规律，如图 1-1 所示。通常在 x 轴的上半部分表示正值，下半部分表示负值。

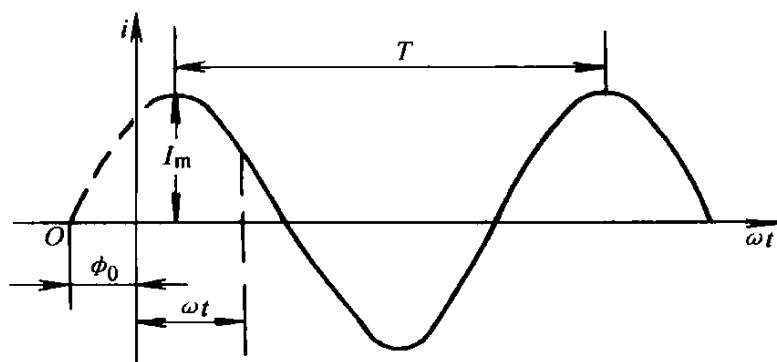


图 1-1 正弦波电流图示

上图中 T 表示交流电的周期，即交流电变化一周所需的时间，单位是秒 (s)。通常规定交流电的瞬时值用小写字母表示，即分别用 i 、 u 、

e 。 i 、 u 、 e 表示交流电的电流、电压、电动势的瞬时值。而电流、电压、电动势的最大值，则用 I_m 、 U_m 、 E_m 来表示。一秒钟内所含的周期数称为交流的频率，用 f 来表示，单位是赫兹 (Hz)。由周期与频率的定义可知，其互为倒数，即：

$$f=1/T$$

在图 1-1 中所表示的 ϕ_0 为正弦变化量的初相角，又称初相。初相是用来表示计时开始时正弦量所处的状态。在图 1-2 所示的正弦曲线中，都是初相角为特殊角的正弦曲线。

最大值、角频率、初相角合称为正弦量的三要素。它们分别表示正弦交流电变化的幅度、快慢和起始状态。由图 1-1 还可以看出，正弦量的瞬时值 i （或 e 或 u ）是时间 t 的函数，只要 I_m （或 E_m 或 U_m ）、 ω （或频率 f ）、 ϕ_0 这三个常量给定了，这个函数也就完全确定了。图 1-1 所示正弦曲线的瞬时值 i 的函数表达式（解析式）为：

$$i = I_m \sin(\omega t + \phi_0)$$

公式中的 ω 即为角频率。它与周期 T 、频率 f 的关系为：

$$\omega = 2\pi/T = 2\pi f$$

ω 的单位是：rad/s(弧度每秒)。

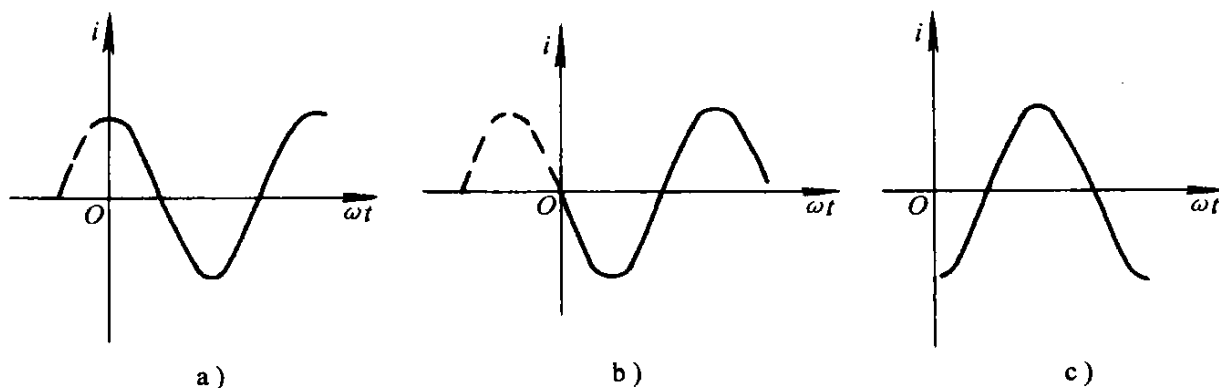


图 1-2 初相为几个特殊角的正弦曲线

$$\text{a) } \phi_0 = \frac{\pi}{2} \quad \text{b) } \phi_0 = \pi \quad \text{c) } \phi_0 = -\frac{\pi}{2}$$

三、正弦交流电的相位差

分析交流电路时，经常会遇到若干个正弦量，这不仅要分析它们之间的数值关系，而且还要分析它们之间的相位关系。本书中只研究同频率正弦量之间的关系。

图 1-3a 所示的是发电机中的两个发电旋转线圈。

若取计时起点时线圈 1 和中性面的夹角为 ϕ_1 ，线圈 2 和中性面的夹角为 ϕ_2 ，则两个线圈在任意位置(瞬间)的感应电动势分别为：

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) \text{ 和 } e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \phi_2)$$

设 $E_{1m} = E_{2m} = E_m$ ，则它们的波形如图 1-3b 所示。

我们把两个同频率正弦量相位之差称为它们的相位差，记作为 ϕ_{12} ，

$$\phi_{12} = (\omega t + \phi_1) - (\omega t + \phi_2) = \phi_1 - \phi_2$$

可见两个同频率正弦量的相位差就等于它们的初相角之差。相位差的取值范围通常是： $-\pi < \phi \leq \pi$ 。

若 $\phi_{12} = \phi_1 - \phi_2 > 0$ ，即 $\phi_1 > \phi_2$ ，这表明 e_1 比 e_2 率先变化到正的极大值或零值。这种情况称为 e_1 的相位超前于 e_2 ，也可以说 e_2 滞后于 e_1 。若 $\phi_{12} = \phi_1 - \phi_2 < 0$ ，即 $\phi_1 < \phi_2$ ，这表明 e_2 超前于 e_1 ，或者说 e_1 滞后于 e_2 。若 $\phi_{12} = 0$ ，即 $\phi_1 = \phi_2$ ，表示两者同时达到极大值或零，这种情况称为 e_1 与 e_2 同相。当 e_1 与 e_2 相位差为 180° 时称为反相，当 e_1 与 e_2 相位差为 90° 时称为正交。

例 1-1 在图 1-4a 所示的电路中，若已知 $i = 100 \sin(314t - \pi/6) \text{ A}$ ， $u = 310 \sin(314t + \pi/3) \text{ V}$ ，试指出：(1) 电流的频率、极大值、初相、 u 与 i 之间的相位差。(2) 画出电压和电流的波形图。

解：(1) 由解析式知， i 与 u 的角频率均为 314 rad/s ，故 $f = \omega/2\pi = 314/6.28 \text{ Hz} = 50 \text{ Hz}$ 。 $I_m = 100 \text{ A}$ 。初相角 ϕ

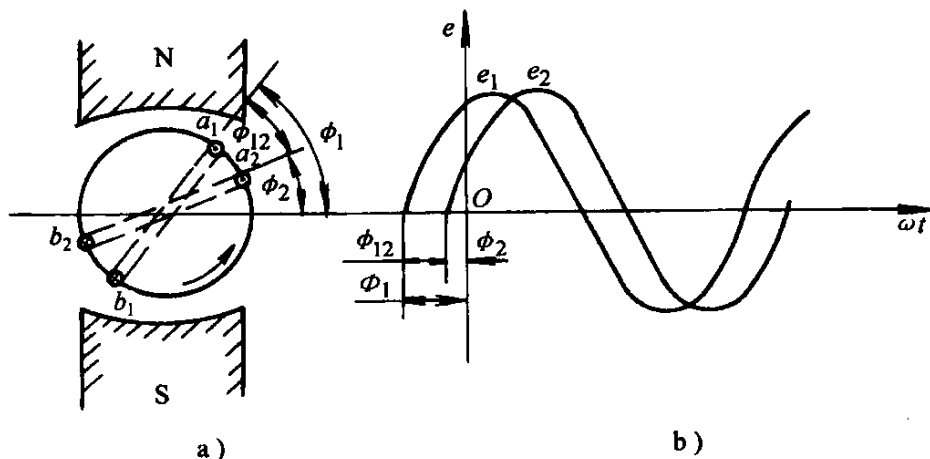


图 1-3 两个初相不为零的电动势

$= -\pi/6, \phi_u = \frac{\pi}{3}$ 两者之间的相位差 $\phi_u - \phi_i = \pi/3 - (-\pi/6) = \pi/2$, 电压超前于电流 $\pi/2$ rad, 即 90° 角或电流滞后于电压 90° 相角。

(2) u 与 i 的波形图如 1-4b 所示。由图可见, 在 $t=0$ 时 u 为正值, $u = 310\sin\pi/3 \text{ V} = 368 \text{ V}$, 方向如图 1-4a 所示。当电压继续变化过 $\pi/6$ rad 时才达到正的极大值。在 $t=0$ 时 i 为负值, 说明瞬间电流的方向与图 1-4a 所示正方向相反, 其值为 $i = 100\sin(-\pi/6) \text{ A} = -50 \text{ A}$, 电流继续变化 $\pi/6$ rad 才达到零值。

四、正弦交流电的有效值

对于周期性变化的电压与电流, 瞬时值仅说明某一瞬间的情况, 而极大值又只能说明其变化的幅度, 两者均无法确切表达出电流在 1 个周期内所产生的整体效应。这个整体效应是

指在一定时间内所实现能量转换的能力。这种能力在电工技术上已习惯于用电流的热效应来衡量。交流电的有效值就是以电流的热效应来规定的。就是说, 无论是周期性变化的电流, 还是恒定不变的直流电, 只要他们在单位时间内的热效应相等, 我们就可以把二者的电流值看作相等, 而该直流电流值就称为交流电流值的有效值。即:

1 个周期内直流电流 I 通过电阻 R 所产生的热量为

$$Q_D = I^2 R T$$

周期性电流 i 在电阻 R 上所产生的热量为

$$Q_A = \int_0^T i^2 R dt$$

两者效应相等, 即 $Q_D = Q_A$, 由此可得出周期性电流 i 的有效值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}$$

取周期性变化量为 $i = I_m \sin \omega t$, 则

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt}$$

$$\text{因为 } \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt = \frac{1}{2} \int_0^T dt - \frac{1}{2} \int_0^T \cos 2\omega t dt = \frac{T}{2}$$

$$\text{所以 } I = \sqrt{\frac{1}{T} I_m^2 \frac{T}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m$$

当电压、电动势均为正弦量时, 同理可得

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0.707 U_m \quad \text{和} \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0.707 E_m$$

在交流电路中, 通常计算求解的电流、电压和电动势都是它们的有效值。电动机、各类用电器等额定电流、额定电压也都用其有效值来表示的, 交流伏特表和交流安培表的读值也是指电流或电压的有效值。

例 1-2 已知 $u = 311 \sin \omega t (\text{V})$, $f = 50 \text{ Hz}$, 求 u 的有效值和 $t = 0.1 \text{ s}$ 时的瞬时值。

解 由已知条件知, $U_m = 311 \text{ V}$

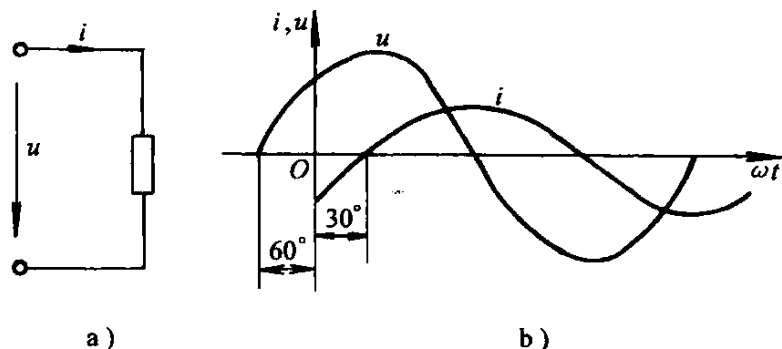


图 1-4 例 1-1 的电路图及波形图

$$\text{所以 } U = 0.707U_m = 0.707 \times 311\text{V} = 220\text{V}$$

$$u = U_m \sin \omega t = 311 \sin(2\pi \times 50 \times 0.1)\text{V} = 0\text{V}$$

五、正弦交流电的旋转矢量表示法

正弦交流电用波形图或解析函数来表示, 均能正确无误地表达出正弦量的三要素。但在交流电路的分析和计算中, 例如, 求某个接点上的电流关系及串联电路中各元件上的电压关系时, 使用上述两种方法则会显得相当繁琐, 结果还不易正确, 但若采用下面介绍的旋转矢量表示法, 则使电路的分析和计算变得较为简单。

以旋转矢量表示正弦量的方法如下: 以电流 $i = I_m \sin(\omega t + \phi_0)$ 为例。在直角坐标系中(如图 1-5 所示), 画一旋转矢量(有方向的线段), 并规定其长度为电流的极大值, 它的初始位置($t=0$ 时的位置)与 X 轴的夹角等于正弦量的初相 ϕ_0 , 矢量以正弦量的角频率 ω 作逆时针方向旋转。于是在某一瞬间, 矢量在 Y 轴上的投影, 就等于该瞬间正弦电流的瞬时值。

$$\begin{aligned} \text{例如: } t=0 \text{ 时} \quad i_0 &= I_m \sin \phi_0 \\ t=t_1 \text{ 时} \quad i_1 &= I_m \sin(\omega t + \phi_0) \end{aligned}$$

如果把若干个同频率的正弦量按其大小(对于同类正弦量应以相同的比例画在同一张图上)和相位, 画在同一个直角坐标系上。这就构成了矢量图。利用矢量图可以很方便地对同频正弦量进行分析和加减运算。

第二节 正弦波的加减运算

在交流电路中, 常需要将几个同频率的同类正弦量相加或相减。设有两个同频率的正弦电动势 $e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \phi_1)$, $e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \phi_2)$, 可以证明, 他们相加的结果仍是一个同频率的正弦量。即:

$$e = e_1 + e_2 = E_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) + E_{2m} \sin(\omega t + \phi_2) = E_m \sin(\omega t + \phi)$$

现在的问题是要设法求出 E_m 和 ϕ 。用旋转矢量求 E_m 和 ϕ 是最常用、最简单的方法。具体方法如下。

如图 1-6 所示, 先在坐标系中画出这两个已知量的旋转矢量 $E_{1m} = OA$, $E_{2m} = OB$; 他们的初相角分别为 $\phi_1 = \angle AOD$, $\phi_2 = \angle BOD$ 。然后以 OA 、 OB 为邻边作一个平行四边形 $OACB$, 它的对角线 OC 就是我们要求的合成电动势 e 的旋转矢量 E_m 。即 OC 的长度等于 e 的最大值 E_m , $\angle COD$ 就等于 e 的初相角。

结论是: 两个同频率正弦量相加, 合成正弦量的

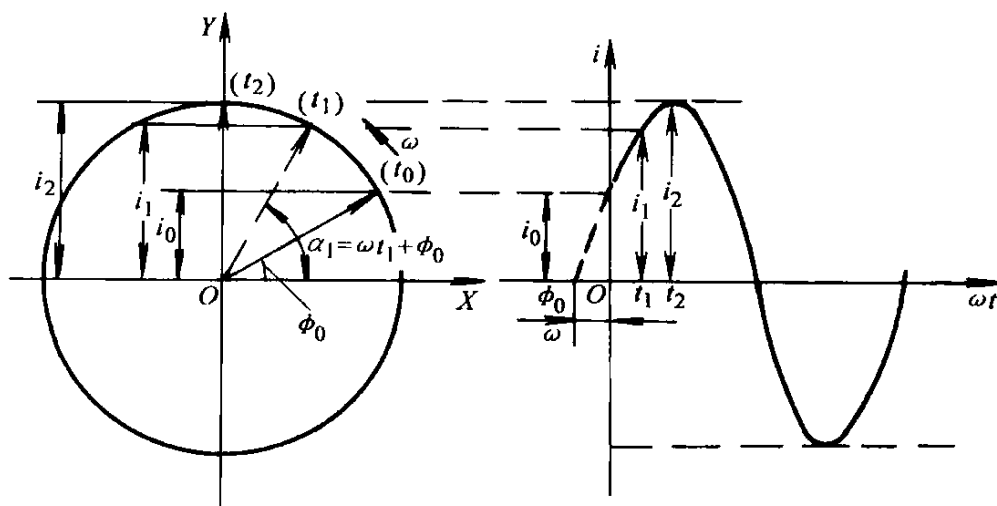


图 1-5 用正弦波形和旋转矢量表示正弦量

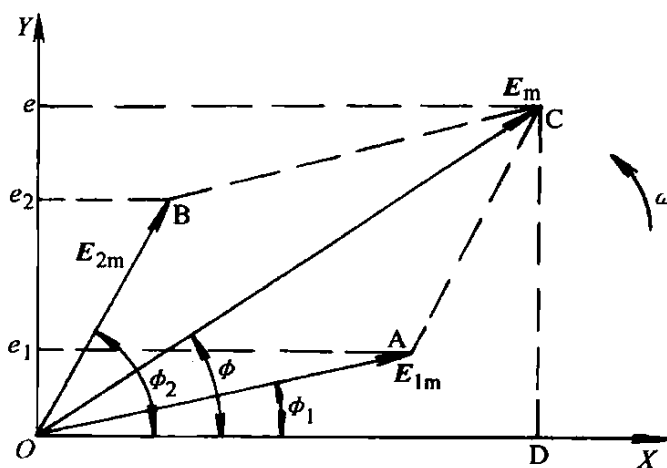


图 1-6 两个正弦量的相加

瞬时值等于它们的瞬时值的代数和；最大值(旋转矢量)等于它们的最大值的矢量和。即：

$$e = e_1 + e_2 \quad E_m = E_{1m} + E_{2m}$$

合成电动势的最大值 E_m 可以按同一比例从图 1-6 中量出来，初相角 ϕ 也可用量角器量得。这种方法叫图解法，该方法虽然很方便，但结果不大准确。如果结合矢量图并辅以三角函数运算，可以求出 E_m 和 ϕ 的准确值，这种方法称为解析法，是我们经常采用的，也是我们要重点掌握的。

利用解析法，先将相加的各矢量分别向 X 坐标轴和 Y 坐标轴分解投影，然后分别求出 X 轴和 Y 轴上各投影的代数和，如图 1-6 中的 OD 和 DC ，再根据勾股定理求合成电动势的最大值。即：

$$E_m = \sqrt{OD^2 + DC^2} = \sqrt{(E_{1m}\cos\phi_1 + E_{2m}\cos\phi_2)^2 + (E_{1m}\sin\phi_1 + E_{2m}\sin\phi_2)^2}$$

合成电动势的初相角 ϕ 由下式确定：

$$\tan\phi = DC/OD = \frac{E_{1m}\sin\phi_1 + E_{2m}\sin\phi_2}{E_{1m}\cos\phi_1 + E_{2m}\cos\phi_2}$$

如果要进行正弦量的减法运算 $e = e_1 - e_2$ ，仍可以利用矢量求和法，即：

$$E_m = E_{1m} + (-E_{2m})$$

这里 $-E_{2m}$ 是与 E_{2m} 反向而等值的矢量，也可以说 $-e_2$ 与 e_2 是反相而等幅的正弦量，即：

$$-e_2 = -E_{2m}\sin(\omega t + \phi_2) = E_{2m}\sin(\omega t + \phi_2 \pm \pi)$$

$-e_2$ 的最大值仍为 E_{2m} ，但其初相角为 $\phi_2 \pm \pi$ ，与 e_2 的初相角 ϕ_2 相差 π 。可见，将 E_{2m} 旋转 180° ，即得 $-E_{2m}$ ，然后再将它与 E_{1m} 求和，如图 1-7 所示。

例 1-3 已知两个正弦电量 $i_1 = 8\sin(\omega t + 60^\circ)\text{A}$ 和 $i_2 = 6\sin(\omega t - 30^\circ)\text{A}$ ，试求 $i = i_1 + i_2$ 。

解 在直角坐标系上分别作出 i_1 和 i_2 的矢量 I_{1m} 和 I_{2m} ，如图 1-8a 所示，然后把 I_{1m} 和 I_{2m} 分解为水平分量和竖直分量。

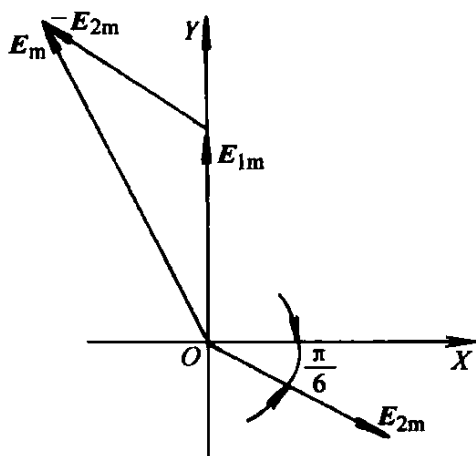


图 1-7 两个正弦量相减

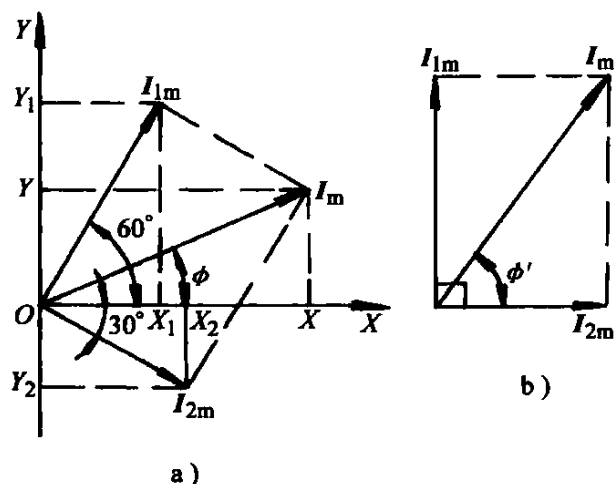


图 1-8 例 1-3 的图

水平分量之和为： $OX = OX_1 + OX_2 = I_{1m}\cos\phi_1 + I_{2m}\cos\phi_2$

$$= [8 \times \cos 60^\circ + 6 \times \cos(-30^\circ)]\text{A} = (8 \times 0.5 + 6 \times 0.866)\text{A} = 9.2\text{A}$$

垂直分量之和为： $OY = OY_1 + OY_2 = I_{1m}\sin\phi_1 + I_{2m}\sin\phi_2$

$$= [8 \times \sin 60^\circ + 6 \times \sin(-30^\circ)]\text{A} = (8 \times 0.866 - 6 \times 0.5)\text{A} = 3.92\text{A}$$

由此可得: $I_m = \sqrt{OX^2 + OY^2} = \sqrt{9.2^2 + 3.92^2} \text{ A} = 10 \text{ A}$

$$\phi = \arctan OY/OX = \arctan 3.92/9.2 = 23^\circ$$

则

$$i = 10 \sin(\omega t + 23^\circ) \text{ A}$$

由于 i_1 和 i_2 的相位差正交, 所以本题还可以用另一种方法求解, 用该方法求解显得更为方便。

取 I_{2m} 作为参考矢量, 画在水平位置上, 如图 1-8b 所示, 则 I_{1m} 超前 $I_{2m} 90^\circ$, 画在垂直向上的位置上, 则:

$$I_m = \sqrt{I_{1m}^2 + I_{2m}^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} \text{ A} = 10 \text{ A}$$

I_m 与 I_{2m} 间的夹角为 ϕ' , 则:

$$\phi' = \arctan I_{1m}/I_{2m} = \arctan 8/9 = 53^\circ$$

由于将 i_2 作为参考矢量时已把正方向转过了 30° , 所以 i 的初相角应为:

$$\phi = \phi' - 30^\circ = 53^\circ - 30^\circ = 23^\circ$$

结果与第一种方法完全相同。

例 1-4 设已知 $u_A = 220 \sqrt{2} \sin(\omega t + 90^\circ) \text{ V}$, $u_B = 220 \sqrt{2} \sin(\omega t - 30^\circ) \text{ V}$ 。求 u_A 与 u_B 之差 $u_{AB} = ?$

解 先分别作出 u_A 与 u_B 的矢量 U_{Am} 和 U_{Bm} , 见图 1-9 所示。然后再在 U_{Am} 的末端作 $-U_{Bm}$ (应和 U_{Bm} 大小相等而相位差 180°)。则其合成矢量 U_{ABm} 即为 u_A 与 u_B 之差 u_{AB} 的矢量。

从矢量图上不难看出, 由于 U_{Am} 与 $-U_{Bm}$ 长度相等, 所以 $\triangle OAB$ 为一等腰三角形, 且 $\angle OAB = 120^\circ$, 故 $\angle BOA = \angle ABO = 30^\circ$, 则:

$$U_{ABm} = 2U_{Am} \cos 30^\circ = \sqrt{3} U_{Am} = \sqrt{3} \times \sqrt{2} \times 220 \text{ V} = 536 \text{ V}$$

$$u_{AB} = 380 \sqrt{2} \sin(\omega t + 120^\circ)$$

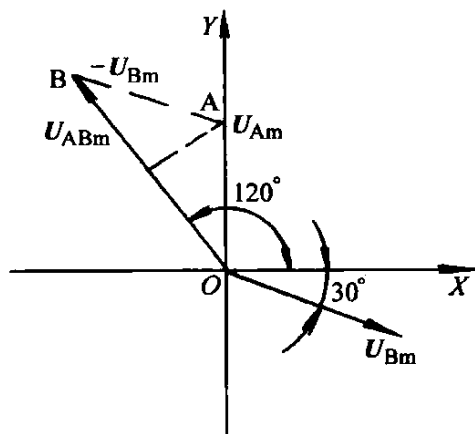


图 1-9 例 1-4 的图

第三节 正弦交流电路分析

一、具有电阻和电感的串联电路

大多数电器都同时含有电阻和电感, 所以分析电阻与电感的串联电路具有广泛的代表性。

图 1-10a 为一含有电阻和电感的串联电路。

假定图中标出的电压、电流方向为正方向, 则电路总的瞬时电压为:

$$u = u_R + u_L$$

设电路中通过的正弦电流为 $i = I_m \sin \omega t$, 由以前所学的知识得知, 加在电阻、电感两端的瞬时值电压分别为:

$$u_R = U_{Rm} \sin \omega t$$

$$u_L = X_L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) = U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ)$$

则总的瞬时值电压为:

$$u = u_R + u_L = U_{Rm} \sin \omega t + U_{Lm} \sin(\omega t + 90^\circ) = U_m \sin(\omega t + \phi)$$

由此可见,总电压也按正弦规律变化,且超前于电流 ϕ 角。具体变化如图 1-10b 所示。

总电压的有效值 U 可用旋转矢量法求得。具体求法如下:因串联电路中通过各元件的电流相等,所以在画矢量图时,取电流为参考矢量,并把电流矢量画在水平位置上,由于电阻两端的电压与电流同相,故其矢量方向与电流相同,而电感两端电压超前于电流 90° ,故矢量 U_L 垂直于电流矢量 I ,且方向朝上。如图 1-11a 所示。

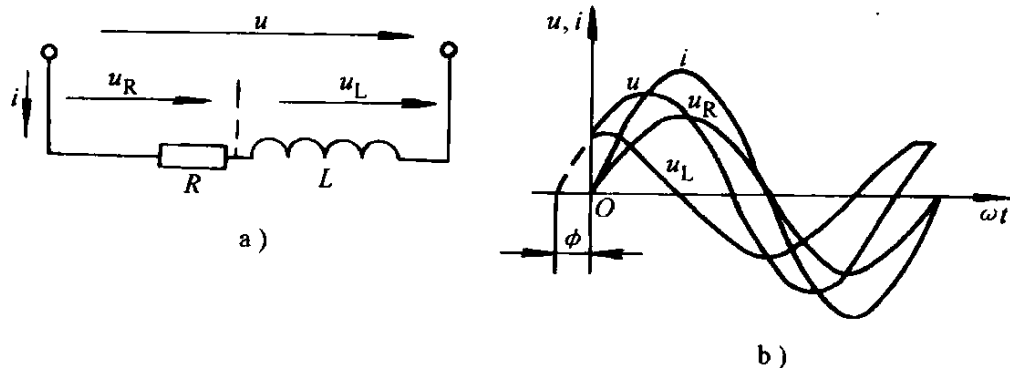


图 1-10 R 、 L 串联电路及电压、电流曲线图

则总电压的有效值为:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = \sqrt{(RI)^2 + (X_L I)^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2} = I |Z|$$

式中 $|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ 称为电路的阻抗,它的单位也是欧姆。

由公式 $|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ 可以看出,阻抗与电阻、感抗也不是简单的代数关系。其也符合直角三角形三边之间的关系,如图 1-11b 所示。

总电压与电流之间的相位差也可以从图 1-11b 阻抗三角形中求得:

$$\phi = \arccos U_R / U = \arccos R / |Z|$$

或

$$\phi = \arctan U_L / U_R = \arctan X_L / R$$

由此可见, ϕ 角的大小与电流、电压的量值无关,而是取决于用电器电阻和电感的大小。因为在交流电路中,只有电阻要消耗功率,所以电阻与电感串联电路中的有功功率为:

$$P = I^2 R = U_R I$$

由于 $U_R = U \cos \phi$,故有功功率的一般公式为:

$$P = UI \cos \phi$$

式中 $\cos \phi$ 是总电压与电流之间相位差的余弦,叫做电路的功率因数。它是表征交流电路状况的重要数据之一。功率因数的大小是由用电器的性质来决定的。

纯电感两端的电压与电流的乘积称为纯电感元件的无功功率,其值为:

$$Q_L = U_L I = UI \sin \phi$$

如果把电压三角形各边均乘以 I ,则得功率三角形,如图 1-11c 所示。图中 P 代表的为有功功率, Q 代表的无功功率, S 代表视在功率或表观功率。 S 并不是电路实际取用的功率,只有 P 才是电路实际取用的功率。

图 1-11 所示的三个三角形分别为电压三角形、阻抗三角形和功率三角形。对于同一电路中,该三个三角形是相似的,故要学会灵活运用。但由于电阻、阻抗、功率不是正弦交流

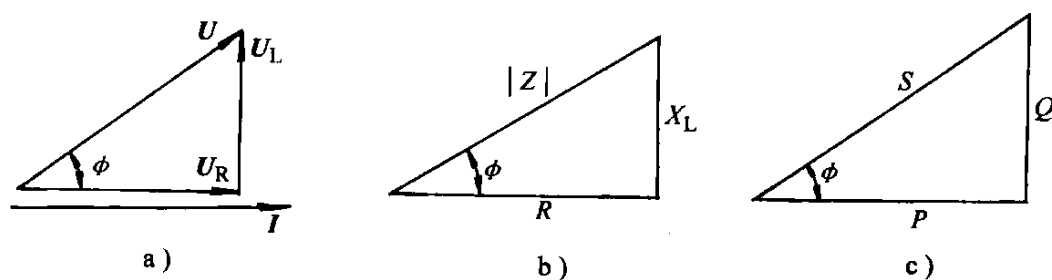


图 1-11 电压、阻抗、功率三角形

电的旋转矢量,故在画三角形时,线段不要带箭头。

例 1-5 把电阻 $R=6\Omega$ 、电感 $L=25.5\text{mH}$ 的线圈接在频率为 50Hz 、电压为 220V 的电路
上,试分别求出 X_L 、 I 、 U_R 、 U_L 、 $\cos\phi$ 、 P 、 S 。

解 $X_L=2\pi fL=2\times 3.14\times 50\times 25.5/1000\Omega=8\Omega$

$$|Z|=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{6^2+8^2}\Omega=10\Omega$$

$$I=U/|Z|=220/10\text{A}=22\text{A}$$

$$U_R=IR=22\times 6\text{V}=132\text{V}$$

$$U_L=IX_L=22\times 8\text{V}=176\text{V}$$

$$\cos\phi=R/|Z|=6/10=0.6$$

$$P=UI\cos\phi=220\times 22\times 0.6\text{W}=2904\text{W}$$

$$S=UI=220\times 22\text{W}=4840\text{W}$$

例 1-6 如图 1-12 所示,设已知 $U=220\text{V}$ 、 $I=5\text{A}$ 、 $R_2=10\Omega$,整个电路取用的有功功率 $P=750\text{W}$,求 R_1 、 X_{L1} 、 U_{AC} 、 $\cos\phi_{AC}$ 。

解:因为电感不消耗电功率,所以

$$P=I^2(R_1+R_2)$$

所以

$$R_1=P/I^2-R_2=(750/25-10)\Omega=20\Omega$$

因为已知电路两端的总电压 U_{AD} 及通过电路的电流 I ,故电路的总阻抗为:

$$|Z_{AD}|=U_{AD}/I=220/5\Omega=44\Omega$$

由于

$$|Z_{AD}|=\sqrt{(R_1+R_2)^2+X_{L1}^2}$$

所以

$$X_L=\sqrt{|Z_{AD}|^2-(R_1+R_2)^2}=\sqrt{44^2-30^2}\Omega=32.3\Omega$$

AC 两点的电压为 $U_{AC}=I|Z_{AC}|$

而

$$|Z_{AC}|=\sqrt{R_1^2+X_{L1}^2}=\sqrt{20^2+32.3^2}\Omega=38\Omega$$

因此

$$U_{AC}=5\times 38\text{V}=190\text{V}$$

$$\cos\phi_{AC}=R_1/|Z_{AC}|=20/38=0.526$$

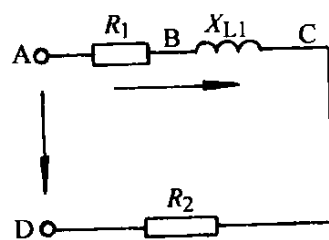


图 1-12 例 1-6 图

二、电阻、电感和电容串联电路

将交流电路中的三种基本元件 R 、 L 、 C 串联起来就组成了一种具有普遍意义的电路。例如,一个实际线圈相当于 R 与 L 串联,把它和一个电容器 C 串联就组成了 RLC 串联电路,如图 1-13a 所示。

设电路中的电流有效值为 I ,则加在电阻两端的电压有效值为 $U_R=RI$,且电压与电流同相位;加在电感两端的电压有效值为 $U_L=X_L I$,且电压超前于电流 90° ;加在电容

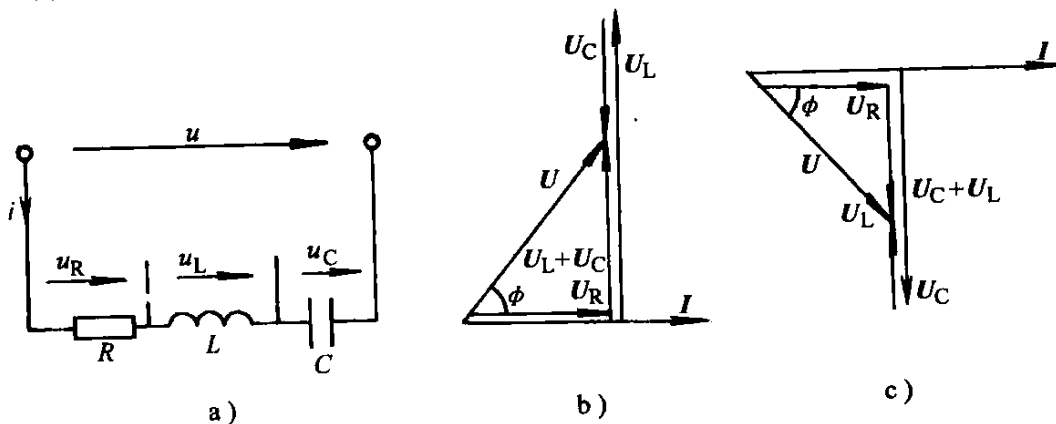


图 1-13 R 、 L 、 C 串联电路及其矢量图

a) 电路图 b) 矢量图 $U_L > U_C$ c) 矢量图 $U_L < U_C$