

普通高等教育“十二五”规划教材



电路

DIANLU

(下册)

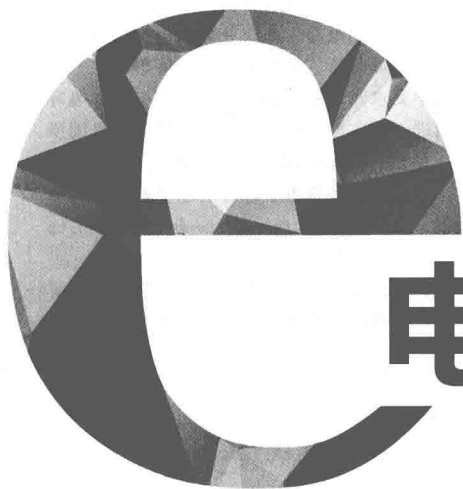
王培峰 主编

- 知识够用，难度合理
- 注意衔接，循序渐进
- 重视实践，学以致用
- 配套齐全，易学易教



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材



电 路 DIANLU (下册)

主 编 王培峰

副主编 周芬萍 孟 尚

编 写 段辉娟 朱玉冉

主 审 赵玲玲

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材,是根据教育部新颁布的电路理论基础课程和电路分析基础课程的教学基本要求,并结合日前教学实际编写的。全书共分8章,主要内容包括含有耦合电感的电路、三相电路、非正弦周期电流电路、线性动态电路的时域分析、线性动态电路的复频域分析、电路方程的矩阵形式、二端口网络和非线性电路分析。每章设有“教学要求及目标”“基本概念”“引入”等环节,注意与以前所学知识的衔接,循序渐进;章末配有典型的习题,供学生巩固所学知识。同时,在每章设计了“实际应用举例”环节,与生活、生产实践相结合,体现了学以致用。为了便于教学与自学,本书配有免费电子课件、电子教案及部分习题答案,凡是选用本书作为教材的单位,均可登录 <http://jc.cepp.sgcc.com.cn> 注册下载。

本书可作为高等院校电气类、电子类、自动化类专业“电路”课程教材,也可作为高等职业院校及成人函授相关专业教材,还可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路. 下册/王培峰主编. —北京:中国电力出版社,2015.8
普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-8011-0

I. ①电… II. ①王… III. ①电路—高等学校—教材 IV. ①TM13

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第193583号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年8月第一版 2015年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13.5印张 326千字

定价 28.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

河北科技大学电类基础课教材编写小组

组 长 王培峰

成 员 马献果 王计花 王冀超 吕文哲

曲国明 朱玉冉 任文霞 刘红伟

刘 磊 安兵菊 许 海 孙玉杰

李翠英 宋利军 张凤凌 张会莉

张成怀 张 敏 岳永哲 孟 尚

周芬萍 赵玲玲 段辉娟 高观望

高 妙 焦 阳 蔡明伟

(以姓氏笔画为序)

序

电工、电子技术是计算机、电子、通信、电气、自动化、测控等众多应用技术的理论基础,同时涉及机械、材料、化工、环境工程、生物工程等众多相关学科。对于这样一个庞大的体系,不可能在学校将所有的知识都教给学生。以应用技术型本科学生为主体的大学教育,必须对学科体系进行必要的梳理。本系列教材就是试图搭建一个电类基础知识体系平台。

2013年1月,教育部为加快发展现代职业教育,建设现代职业教育体系,部署了应用科技大学改革试点战略研究项目,成立了“应用技术大学(学院)联盟”,其目的是探索“产学研一体、教学做合一”的应用型人才培养模式,促进地方本科高校转型发展。河北科技大学作为河北省首批加入“应用技术大学(学院)联盟”的高校,对电类技术课程进行了试点改革,并根据教育部高等学校教学指导委员会制定的“专业规划和基本要求、学科发展和人才培养目标”,编写了本套教材。本套教材特色如下:

(1)教材的编写以教育部高等学校教学指导委员会制定的“专业规划和基本要求”为依据,以培养服务于地方经济的应用型人才为目标,系统整合教学改革成果,使教材体系趋于完善,教材结构完整,内容准确,理论阐述严谨。

(2)教材的知识体系和内容结构具有较强的逻辑性,利于培养学生的科学思维能力;根据教学内容、学时、教学大纲的要求,优化知识结构,既加强理论基础,也强化实践内容;理论阐述、实验内容和习题的选取都紧密联系实际,培养学生分析问题和解决问题的能力。

(3)课程体系整体设计,各课程知识点合理划分,前后衔接,避免各课程内容之间交叉重复,使学生能够在规定的课时数内,掌握必要的知识和技术。

(4)以主教材为核心,配套出版学习指导、实验指导书、多媒体课件,提供全面的教学解决方案,实现多角度、多层面的人才培养模式。

本套教材由王培峰老师任编写小组组长。主要包括《电路》(上、下册,王培峰主编)、《模拟电子技术基础》(张凤凌主编)、《数字电子技术基础》(高观望主编)、《电路与电子技术基础》(马献果等编)、《电路学习指导书》(上册,朱玉冉主编;下册,孟尚主编)、《模拟电子技术学习指导书》(张会莉主编)、《数字电子技术学习指导书》(任文霞主编)、《电路实验教程》(李翠英主编)、《电子技术实验与课程设计》(安兵菊主编)、《电工与电子技术实验教程》(刘红伟等编)等。

提高教学质量,深化教学改革,始终是高等学校的工作重点,需要所有关心高等教育事业人士的热心支持。为此谨向所有参与本系列教材建设的同仁致以衷心的感谢!

本套教材可能会存在一些不当之处,欢迎广大读者提出批评和建议,以促进教材的进一步完善。

电类基础课教材编写小组

2014年10月

前 言

为了适应教育教学改革的发展,培养高素质的人才,根据国家“十二五”规划教材建设的要求,编写了本书。

“电路”课程是电类专业学生接触的第一门专业基础课。作为入门课程,应该使学生领略进行科学研究的最基本、最一般的方法。通过本课程的学习,力求使学生不仅要掌握电路的基本理论,学会对电路进行分析计算,更重要的是提高分析问题、解决问题的能力。为此,本书在以下几个方面做了努力:

(1) 注重经典电路理论和近代电路理论的发展,注意保持电类专业的特色。随着教学改革的深入,“电路”课程的教学时数总体下降。因此,删繁就简是电路理论教学的发展趋势。在保持经典电路理论体系的同时,部分内容的解算过程从简,突出重点、明确思路。

(2) 突出应用。电路分析理论课程不仅理论严谨,而且具有广泛的实用性和工程应用性,所以,本书在重点章节设计了应用实例来讲述理论在实际中的应用,从而切实可行地使学生了解电路分析理论是如何与实际应用紧密相连的。

(3) 为了便于学生更好地学习和把握“电路”课程的主要内容和重点,每一章均附有本章的“教学要求及目标”;在大部分节设置“基本概念”和“引入”模块,便于学生更好、更快地学习本课程。

(4) 为使学生深入掌握所学理论知识,提高学生科学的思维能力和分析计算能力,本书设置了丰富的例题,部分例题给出多种解法,并且每章都有习题,以提高学生分析和解决实际问题的能力。

(5) 为适应教学改革和目前课堂教学学时压缩的需要,在编写本书时,对电路分析的基本内容均给予系统和详细地讲解,既注重内容全面,又注意全书结构简单。在使用本书的过程中,可以根据各个专业的不同需要,适当删减章节,加“*”的内容是扩展内容,可根据教学实际酌情选讲。

本书建议授课的学时为64学时,实验参考学时约为18学时。具体学时安排需依照各学校具体情况自主灵活地制定教学计划。

为配合本书教学,另外编写有《电路学习指导书》,可作为本书的教学和学习参考书。

本书由王培峰担任主编,周芬萍、孟尚担任副主编,参加编写的还有段辉娟、朱玉冉。具体编写分工如下:朱玉冉编写第1、第3章,段辉娟编写第2章,周芬萍编写第4章,王培峰编写第5、第7章,孟尚编写第6、第8章。全书由王培峰负责编写提纲和统稿。

本书由赵玲玲精心审阅,提出了宝贵意见,谨致以衷心的感谢。

编者在编写本书时,查阅和参考了众多文献资料,获得了许多教益和启发,也得到许多老师的帮助,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,书中的疏漏和不妥之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见,以便修改。

编 者

2015年3月

目 录

序

前言

1 含有耦合电感的电路	1
1.1 耦合电感	1
1.2 含有耦合电感电路的分析	6
1.3 空心变压器	12
1.4 理想变压器	15
1.5 实际应用举例——特殊变压器	20
小结	21
习题	22
2 三相电路	25
2.1 三相电路	25
2.2 线电压(电流)与相电压(电流)的关系	28
2.3 对称三相电路的计算	31
2.4 不对称三相电路的概念	36
2.5 三相电路的功率	39
2.6 实际应用举例——三相异步电动机的星形-三角形(Y- Δ)换接起动	44
小结	44
习题	45
3 非正弦周期电流电路	47
3.1 非正弦周期信号及其傅里叶级数	47
3.2 有效值、平均值和平均功率	53
3.3 非正弦电流电路的计算	56
3.4 实际应用举例——矩形波发生器	61
小结	61
习题	63
4 线性动态电路的时域分析	66
4.1 动态电路的方程及其初始条件	66
4.2 一阶电路的零输入响应和零状态响应	70
4.3 一阶电路的全响应	78
4.4 一阶电路的阶跃响应和冲激响应	83
4.5 二阶电路	90
4.6 实际应用举例——微分电路与积分电路	99
小结	100

习题	102
5 线性动态电路的复频域分析	108
5.1 拉普拉斯变换及其性质	108
5.2 拉普拉斯反变换	113
5.3 复频域中的电路定律与电路模型	117
5.4 应用拉普拉斯变换法分析线性动态电路	121
5.5 网络函数	125
5.6 实际应用举例——化为零初始状态电路的计算	132
小结	134
习题	136
6 电路方程的矩阵形式	140
6.1 基本回路和基本割集	140
6.2 网络矩阵	143
6.3 节点电压方程的矩阵形式	148
6.4 回路电流方程的矩阵形式	152
6.5 实际应用举例——电梯接近开关、同轴电缆	156
小结	158
习题	159
7 二端口网络	162
7.1 二端口	162
7.2 二端口的参数和参数方程	163
7.3 二端口的等效电路	172
7.4 二端口的网络函数和特性阻抗	174
7.5 二端口的连接	177
7.6 含有二端口电路的计算	182
7.7 实际应用举例——回转器和负阻抗变换器	187
小结	189
习题	190
8 非线性电路分析	193
8.1 非线性元件特性	193
8.2 非线性电路的方程	197
8.3 非线性电路的分析方法	198
*8.4 电路中的混沌现象	202
8.5 实际应用举例——非线性电路在自动生产线中的应用	203
小结	204
习题	204
参考文献	206

1 含有耦合电感的电路

二端元件是用元件两端电压和流过元件的电流之间的关系表征的。例如,电阻、电感、电容元件均是二端元件。除了二端元件外,电路中还有一种元件称为耦合元件。耦合元件不止一条支路,其中一条支路的电压或电流与另一条支路的电压或电流相关联。受控源就是一种耦合元件。本章将介绍另两种耦合元件,即耦合电感和变压器,它们依靠线圈间的电磁感应现象而工作,在工程上有着广泛的应用。本章主要讨论这两种元件的伏安关系和含有这两种元件的电路的分析方法。

【教学要求及目标】

知识要点	目标与要求	相关知识	掌握程度评价
耦合电感	掌握	磁场、磁通链、电磁感应定律	
含有耦合电感电路的分析	理解和掌握	感应电压、去耦等效	
空心变压器	理解和掌握	自阻抗、输入阻抗	
理想变压器	理解和掌握	全耦合	

1.1 耦 合 电 感

【基本概念】

磁耦合: 线圈之间通过彼此的磁场相互联系的物理现象,称为磁耦合。

耦合线圈: 有磁耦合的两个或两个以上的线圈,称为耦合线圈。

耦合电感: 假定各线圈的位置固定,并且忽略线圈本身所具有的电阻和匝间的分布电容,得到的耦合电感线圈的理想化模型,称为耦合电感。

【引入】

当给一个线圈通过变化的电流 i 时,线圈周围将建立磁场,磁场方向可用右手螺旋法则判定。图 1-1 所示为电感为 L 的 N 匝电感线圈,其磁通链与电流的关系为

$$\psi = N\varphi = Li$$

当通过电感线圈的电流 i 发生变化时,形成感应电压 u 。若感应电压 u 与电流 i 取关联参考方向,则

$$u = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

两个耦合线圈通入电流时,产生的磁耦合现象以及感应电压的情况又会是怎样的呢?

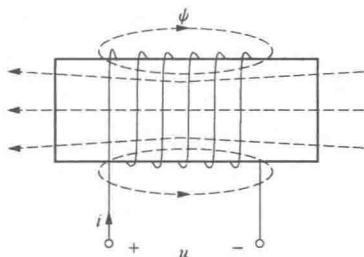


图 1-1 电感线圈

1.1.1 耦合电感的伏安关系

当周围空间为线性磁介质时,两个耦合的线圈1、2,线圈匝数分别为 N_1 和 N_2 ,自感分别为 L_1 和 L_2 。其中的电流 i_1 和 i_2 又称为施感电流。当电流 i_1 通过线圈1时,线圈1中将产生自感磁通 φ_{11} ,方向如图1-2(a)所示, φ_{11} 在穿越自身的线圈时,与线圈的各匝交链,所产生的磁通链为 ψ_{11} 。 ψ_{11} 称为自感磁通链, $\psi_{11}=N_1\varphi_{11}=L_1i_1$ 。 φ_{11} 的一部分或全部交链线圈2时,线圈1对线圈2的互感磁通为 φ_{21} , φ_{21} 在线圈2中产生的磁通链为 ψ_{21} 。 ψ_{21} 称为互感磁通链, $\psi_{21}=N_2\varphi_{21}=M_{21}i_1$ 。 M_{21} 是线圈1与线圈2的互感系数,简称互感。互感磁通链的方向由施感电流方向、线圈绕向及两线圈相对位置决定。当施感电流 i_1 发生变化时,电流与磁通符合右手螺旋法则,依据电磁感应定律,线圈1上自感磁通链 ψ_{11} 变化形成自感电压 u_{11}

$$u_{11} = \frac{d\psi_{11}}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt}$$

线圈2互感磁通链 ψ_{21} 变化形成互感电压 u_{21}

$$u_{21} = \frac{d\psi_{21}}{dt} = M_{21} \frac{di_1}{dt}$$

同样地,当线圈2中通以电流 i_2 时,在线圈2中产生自感磁通 φ_{22} 和自感磁通链 ψ_{22} ,且 $\psi_{22}=N_2\varphi_{22}=L_2i_2$;在线圈1中产生互感磁通 φ_{12} 和互感磁通链 ψ_{12} ,且 $\psi_{12}=N_1\varphi_{12}=M_{12}i_2$,这里 M_{12} 是线圈2与线圈1的互感。在线性条件下,有

$$M_{12} = M_{21} = M$$

因此,以后不再区分 M_{12} 和 M_{21} 。互感 M 与自感 L 的单位相同,都是亨(H)。本书中 M 恒取正值。当施感电流 i_2 发生变化时,线圈2上自感磁通链 ψ_{22} 变化,形成自感电压 u_{22}

$$u_{22} = \frac{d\psi_{22}}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt}$$

线圈1互感磁通链 ψ_{12} 变化,形成互感电压 u_{12}

$$u_{12} = \frac{d\psi_{12}}{dt} = M \frac{di_2}{dt}$$

两个线圈互相耦合如图1-2(b)所示。

每个耦合线圈的磁通链等于自感磁通链和互感磁通链两部分的代数和。设线圈1和线圈2的磁通链分别为 ψ_1 和 ψ_2 ,则

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= \psi_{11} \pm \psi_{12} = L_1 i_1 \pm M i_2 \\ \psi_2 &= \pm \psi_{21} + \psi_{22} = \pm M i_1 + L_2 i_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式(1-1)表明,耦合线圈中的磁通链与施感电流成线性关系,是施感电流独立产生的磁通链叠加的结果。 M 前的“ \pm ”号说明磁耦合中互感作用的两种可能性:“ $+$ ”号表示互感磁通链与自感磁通链方向一致,称为互感的“增助”作用,如图1-2(c)所示;“ $-$ ”号则相反,称为互感的“削弱”作用。

设线圈1和线圈2的自感分别为 L_1 和 L_2 ,互感为 M ,施感电流分别为 i_1 和 i_2 ,端电压分别为 u_1 和 u_2 , u_1 不仅与 i_1 有关也与 i_2 有关, u_2 也如此。端电压与施感电流取关联参考方向时,则有

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \frac{d\psi_1}{dt} = u_{11} \pm u_{12} = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 &= \frac{d\psi_2}{dt} = \pm u_{21} + u_{22} = \pm M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式(1-2)表示两耦合电感的电压电流关系,即伏安关系,表明耦合电感上的电压是自感电压和互感电压的代数和。自感电压总为正,互感电压可正可负:当互感磁通链与自感磁通链相互“增助”时,互感电压为正;反之互感电压为负。图1-2(c)中,互感电压为正,即伏安关系式的 M 前用“+”号。

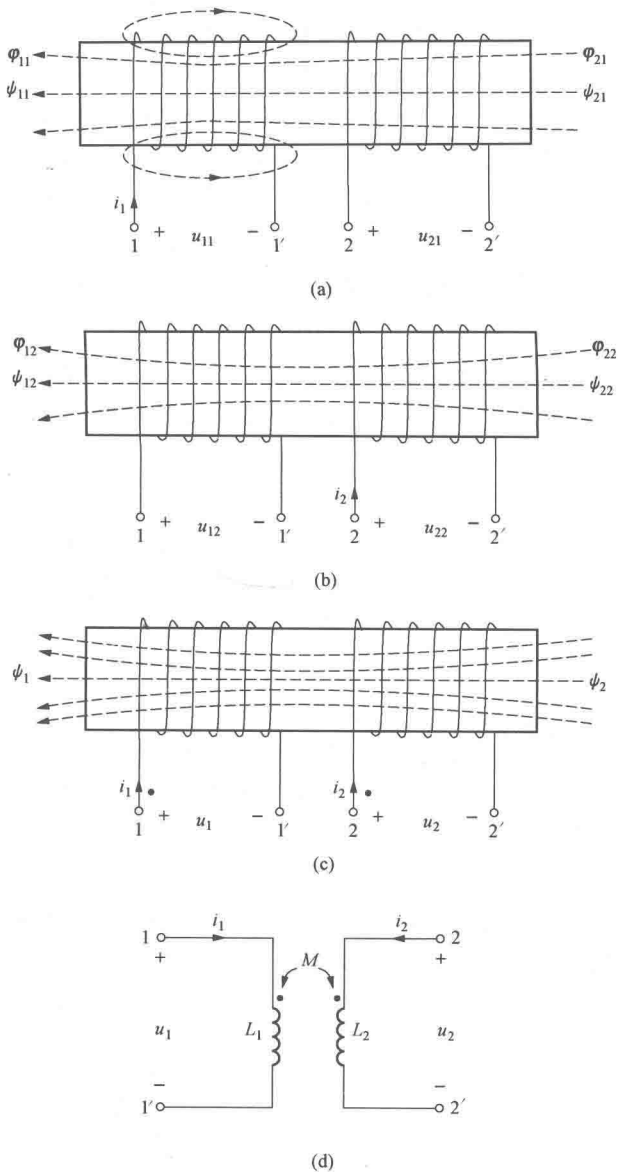


图 1-2 两个线圈互相耦合

在正弦稳态激励下,耦合电感伏安关系式的相量形式为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= j\omega L_1 \dot{I}_1 \pm j\omega M \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= \pm j\omega M \dot{I}_1 + j\omega L_2 \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中, $j\omega L_1$ 和 $j\omega L_2$ 分别为两线圈自感抗; $j\omega M$ 为互感抗。

1.1.2 耦合电感的同名端

线圈电压等于自感电压和互感电压的代数和。自感电压与施感电流在同一线圈上,只要参考方向确定了,其数学描述便可容易写出,而无需考虑线圈的绕向。对互感电压,因产生该电压的电流在另一线圈上,因此,要确定其符号,就必须知道两个线圈的绕向。但实际的线圈往往是密封的,无法看到其具体绕向,并且在电路图中绘出线圈的绕向也很不方便。为解决这个问题引入同名端的概念。同时也为了便于反映互感的“增助”或“削弱”简化图形表示,采用同名端标记方法。对两个有耦合的线圈各取一个端子,并用相同的符号标记,如“·”或“*”。当两个电流分别从两个线圈的对应端子同时流入或流出时,若产生的磁通相互增强,则这两个对应端子称为两互感线圈的同名端。反之,则称这两个对应端子为两互感线圈的异名端。例如,图 1-2 (c) 中,端子 1、2 或 1'、2' 为同名端,在图中用“·”表示。有了同名端的规定,图 1-2 (d) 即为对应耦合线圈在电路中有同名端标记的电路模型表示。如果两个耦合线圈的绕向和相对位置不改变,而只改变某个施感电流的参考方向,则线圈的同名端不变。

在已知耦合线圈的绕向和相对位置的情况下,当两个线圈中电流同时由同名端流入时,两个电流产生的磁场相互增强,而且施感电流的入端与耦合线圈上互感电压的“+”极性端

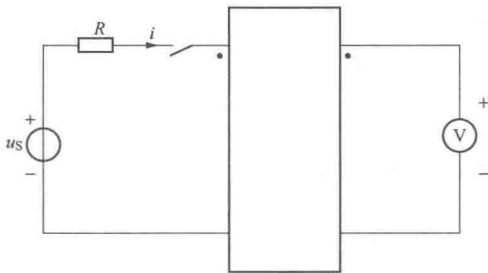


图 1-3 实验方法确定同名端

为一对同名端。在实验室和工程实际中,两组线圈装在黑盒里,只引出四个端线,要通过实验的方法确定其同名端:当随时间增大的时变电流从一线圈的一端流入时,将会引起另一线圈相应同名端的电位升高,如图 1-3 所示。

有了同名端,表示两个线圈相互作用时,就不需考虑实际绕向,而只根据电压、电流参考方向即可知道耦合电感的伏安关系:如果电流的参考方向由线圈的同名端流入另一端,那么

由这个电流在另一线圈内产生的互感电压的参考方向也应由该线圈的同名端指向另一端,如图 1-4 所示。

互感电压的作用也可用电流控制电压源 (CCVS) 来表示,对于电路图 1-2 (d) 可用图 1-5 所示电路 (相量形式) 来等效。

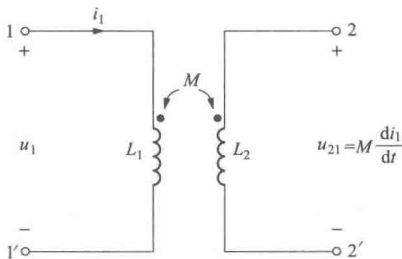


图 1-4 利用同名端判定互感电压方向

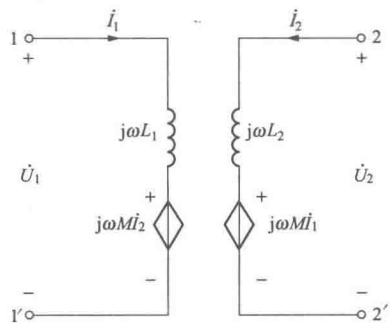


图 1-5 图 1-2 (d) 的受控源等效电路

【例 1-1】 电路如图 1-6 所示, (a)、(b)、(c) 三个互感线圈, 已知同名端和各线圈上电压电流参考方向, 试写出每一互感线圈上的电压电流关系。

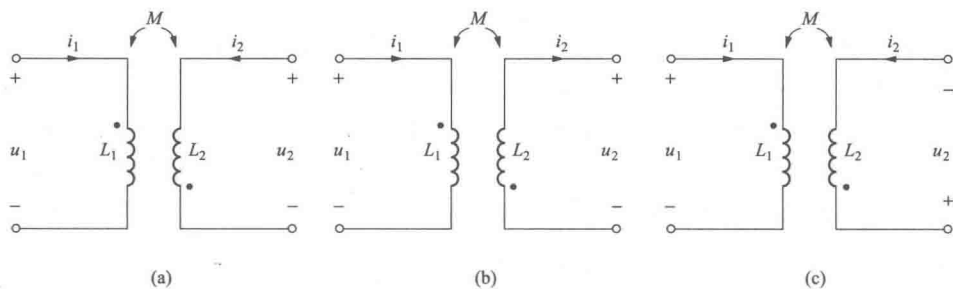


图 1-6 [例 1-1] 图

解 (a) 两施感电流从异名端流入, 互感“削弱”, 两耦合线圈的电压与施感电流为关联参考方向。 $u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}$, $u_2 = -M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}$ 。

(b) 两施感电流从同名端流入, 互感“增助”, 线圈 1 的电压与施感电流为关联参考方向, 线圈 2 的电压与施感电流为非关联参考方向。 $u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$, $u_2 = -M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt}$ 。

(c) 两施感电流从异名端流入, 互感“削弱”, 线圈 1 的电压与施感电流为关联参考方向, 线圈 2 的电压与施感电流为非关联参考方向。 $u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}$, $u_2 = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt}$ 。

同名端总是成对出现的, 如果有两个或两个以上的线圈彼此间都存在磁耦合时, 同名端应一对一对地加以标记, 每一对需用不同的符号标出。

1.1.3 耦合因数

工程上为了定量地描述两个耦合线圈的耦合紧密程度, 把两线圈的互感磁通链与自感磁通链比值的几何平均定义为耦合因数, 用 k 表示, 即

$$k = \sqrt{\frac{|\psi_{12}|}{\psi_{11}} \cdot \frac{|\psi_{21}|}{\psi_{22}}} \quad (1-4)$$

由于 $\psi_{11} = L_1 i_1$, $|\psi_{12}| = M i_2$, $\psi_{22} = L_2 i_2$, $|\psi_{21}| = M i_1$, 代入式 (1-4), 有

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1-5)$$

k 值在 0 与 1 之间。 $k=0$ 时, 互感 $M=0$, 说明两线圈没有耦合。 k 值越大, 说明两个线圈之间耦合越紧密。 $k=1$ 时, 称为全耦合, 此时

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表示互感 M 达到最大值, 意味着不存在只与一个线圈交链的磁通 (称为漏磁通), 而是一个线圈电流产生的磁通全部与另一线圈的每一匝相交链, 即同一施感电流产生的互感磁通和自感磁通相同, 有

$$\varphi_{11} = \varphi_{21}, \varphi_{12} = \varphi_{22}$$

则穿过两个线圈的总磁通 (称为主磁通) 相同, 有

$$\varphi = \varphi_{11} + \varphi_{22}$$

两耦合线圈的磁通链分别为

$$\psi_1 = N_1 \varphi, \psi_2 = N_2 \varphi$$

耦合因数 k 的大小与两线圈的结构、相互位置以及周围磁介质有关。改变或调整两线圈的相互位置,有可能改变耦合因数 k 的大小。在电子电路和电力系统中,为了更有效地传输信号或功率,希望两线圈的耦合程度越高越好,利用密绕的方式,使 k 尽可能接近 1,一般采用铁磁性材料制成的心子可达到这一目的。在工程上有时尽量减少互感的作用,使实际的电气设备或系统内部线圈少受或不受干扰影响,除了采用屏蔽手段外,一个有效的方法就是合理布置这些线圈的相互位置(如将两线圈相互垂直放置),这样可以大大地减小耦合作用。

1.2 含有耦合电感电路的分析

【基本概念】

等效变换: 将电路中的某部分用另一种电路结构与元件参数代替后,不影响原电路中未作变换的任何一条支路中的电压和电流。

去耦合等效: 对含有耦合电感的电路消去互感,用无耦合的等效电路去代替的过程,称为去耦合等效。

去耦等效电路: 把具有互感的电路化为等效的无互感的电路的处理方法,称为去耦法,把得到的等效无互感电路称为去耦等效电路。

【引入】

在分析含有耦合电感的电路(简称互感电路)的正弦交流电路时,可以采用两种分析方法。一种是带耦合直接分析法,这种分析方法和《电路(上册)》中介绍的正弦稳态分析法一样,即采用相量法列写 KCL 和 KVL 方程。在列写 KVL 方程时,要注意耦合电感上的电压既有自感电压,又有互感电压;必要时可引入 CCVS 表示互感的作用。另一种分析方法是去耦法。如果能得到含有耦合电感电路的去耦等效电路,就可不必计入由于互感的作用而引起的互感电压,最终可达到简化这类电路的目的。

耦合电感的两个线圈在实际电路中,一般要以某种方式相互连接,基本的连接方式有串联、并联和三端(T型)连接。本节就介绍三种基本连接方式及其去耦等效分析法。

1.2.1 耦合电感的串联

耦合电感的串联有顺接串联和反接串联两种方式。电流从两个电感的同名端流进(或流出),两个互感相互增强,称为顺接串联,顺接串联是一对异名端相连接,如图 1-7(a)所示。相反地,电流从两个电感的异名端流进,两个互感相互削弱,称为反接串联,反接串联是一对同名端相连接,如图 1-7(b)所示,应用 KVL:

$$u = u_1 + u_2 = \left(L_1 \frac{di}{dt} \pm M \frac{di}{dt} \right) + \left(\pm M \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} \right) = (L_1 + L_2 \pm 2M) \frac{di}{dt} = L_{eq} \frac{di}{dt} \quad (1-7)$$

式中, M 前“+”号对应于顺接串联,“-”号对应于反接串联。串联时去耦等效电路如图 1-7(c)所示,两部分电感串联也可用一个等效电感 L_{eq} 替代,如图 1-7(d)所示,其中

$$L_{eq} = L_1 + L_2 \pm 2M \quad (1-8)$$

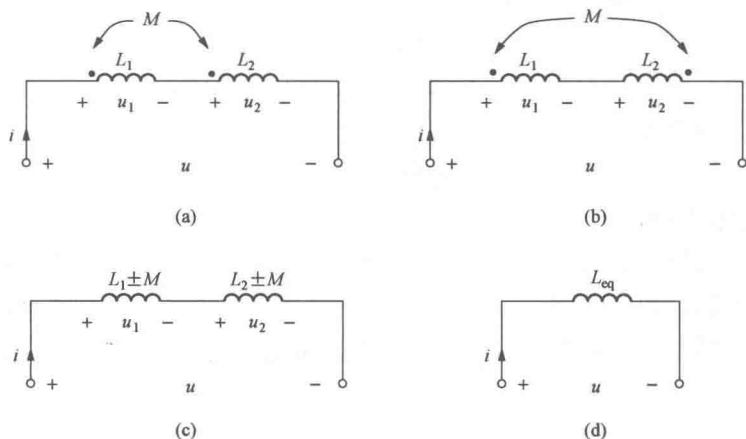


图 1-7 耦合电感串联及其去耦等效电路

(a) 顺接串联; (b) 反接串联; (c) 去耦等效电路; (d) 等效电路

耦合电感为储能元件, 串联连接时, 任一时刻, 储能为

$$W = \frac{1}{2} L_{\text{eq}} i^2 \geq 0$$

因此有

$$L_{\text{eq}} = L_1 + L_2 \pm 2M \geq 0$$

故耦合电感的互感 M 不能大于两自感的算术平均值, 即

$$M \leq \frac{1}{2} (L_1 + L_2)$$

而且, 顺接串联时, 电感增大。反接串联后, 电感变小, 但电路仍呈感性。

【例 1-2】 电路如图 1-8 所示, 已知 $\dot{U} = 50 \angle 0^\circ \text{V}$, 线圈参数 $R_1 = 3 \Omega$, $j\omega L_1 = j7.5 \Omega$, $R_2 = 5 \Omega$, $j\omega L_2 = j12.5 \Omega$, $j\omega M = j8 \Omega$, 求 (1) 该耦合电感的耦合因数 k ; (2) 电路电流 \dot{I} ; (3) 各支路的复功率。

解 (1) 耦合因数

$$\begin{aligned} k &= \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{\omega M}{\sqrt{\omega L_1 \cdot \omega L_2}} \\ &= \frac{8}{\sqrt{7.5 \times 12.5}} \approx 0.826 \end{aligned}$$

(2) 两线圈支路的等效阻抗和电路的输入阻抗分别为

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + (j\omega L_1 - j\omega M) = (3 - j0.5) \Omega (\text{容性}) \\ Z_2 &= R_2 + (j\omega L_2 - j\omega M) = (5 + j4.5) \Omega (\text{感性}) \\ Z_{\text{in}} &= Z_1 + Z_2 = 8 + j4 \approx 8.94 \angle 26.57^\circ (\Omega) (\text{感性}) \end{aligned}$$

已知 $\dot{U} = 50 \angle 0^\circ \text{V}$, 则电流

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z_{\text{in}}} = \frac{50 \angle 0^\circ}{8.94 \angle 26.57^\circ} \approx 5.59 \angle -26.57^\circ (\text{A})$$

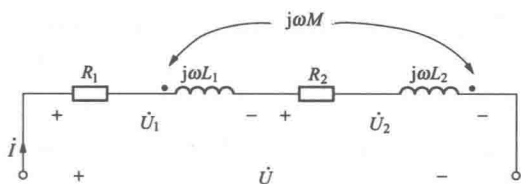


图 1-8 [例 1-2] 图

(3) 线圈支路吸收复功率分别为

$$\begin{aligned}\bar{S}_1 &= I^2 Z_1 = (93.75 - j15.63) \text{V} \cdot \text{A} \\ \bar{S}_2 &= I^2 Z_2 = (156.25 + j140.63) \text{V} \cdot \text{A}\end{aligned}$$

电源发出的复功率为

$$\bar{S} = \bar{S}_1 + \bar{S}_2 = \dot{U} \dot{I}^* = (250 + j125) \text{V} \cdot \text{A}$$

1.2.2 耦合电感的并联

耦合电感的两线圈并联也有两种形式：一种是两个电感的同名端相连，或者同名端在同一侧，称为同侧并联，如图 1-9 (a) 所示；另一种是两个线圈的异名端相连，或者异名端在同一侧，称为异侧并联，如图 1-9 (b) 所示。耦合电感并联的等效电路如图 1-9 (c) 所示。

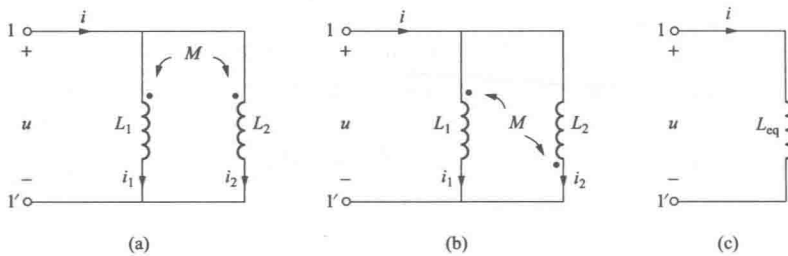


图 1-9 耦合电感并联及其等效电路

(a) 同侧并联；(b) 异侧并联；(c) 等效电感

设各线圈上电压电流及其参考方向如图 1-9 (a)、(b) 所示，则由耦合电感的伏安关系可得

$$\left. \begin{aligned}i &= i_1 + i_2 \\ u &= L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt} \\ u &= \pm M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}\end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

式 (1-9) 中， M 前“+”号对应于同侧并联，“-”号对应于异侧并联。三式联立，解得

$$u = L_{\text{eq}} \frac{di}{dt} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \mp 2M} \frac{di}{dt} \quad (1-10)$$

式 (1-10) 中， M 前“-”号对应于同侧并联，“+”号对应于异侧并联。去耦等效电路的等效电感为

$$L_{\text{eq}} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \mp 2M} \quad (1-11)$$

1.2.3 耦合电感的三端 (T 型) 连接

如果耦合电感的两条支路各有一端与第三条支路形成一个仅含三条支路的共同节点，称为耦合电感的三端 (T 型) 连接。显然耦合电感的并联也属于 T 型连接。

T 型连接有两种方式，一种是同名端连在一起，如图 1-10 (a) 所示，称为同名端为共同端的 T 型连接；另一种是异名端连在一起，如图 1-10 (b) 所示，称为异名端为共同端的 T 型连接。

对图 1-10 (a) 同名端为共同端的 T 型连接电路, 两耦合电感的电压方程为

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{13} &= j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 \\ \dot{U}_{23} &= j\omega M \dot{I}_1 + j\omega L_2 \dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

由 $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$, 有 $\dot{I}_1 = \dot{I} - \dot{I}_2$ 和 $\dot{I}_2 = \dot{I} - \dot{I}_1$, 代入式 (1-12), 得

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{13} &= j\omega(L_1 - M)\dot{I}_1 + j\omega M\dot{I} \\ \dot{U}_{23} &= j\omega M\dot{I} + j\omega(L_2 - M)\dot{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

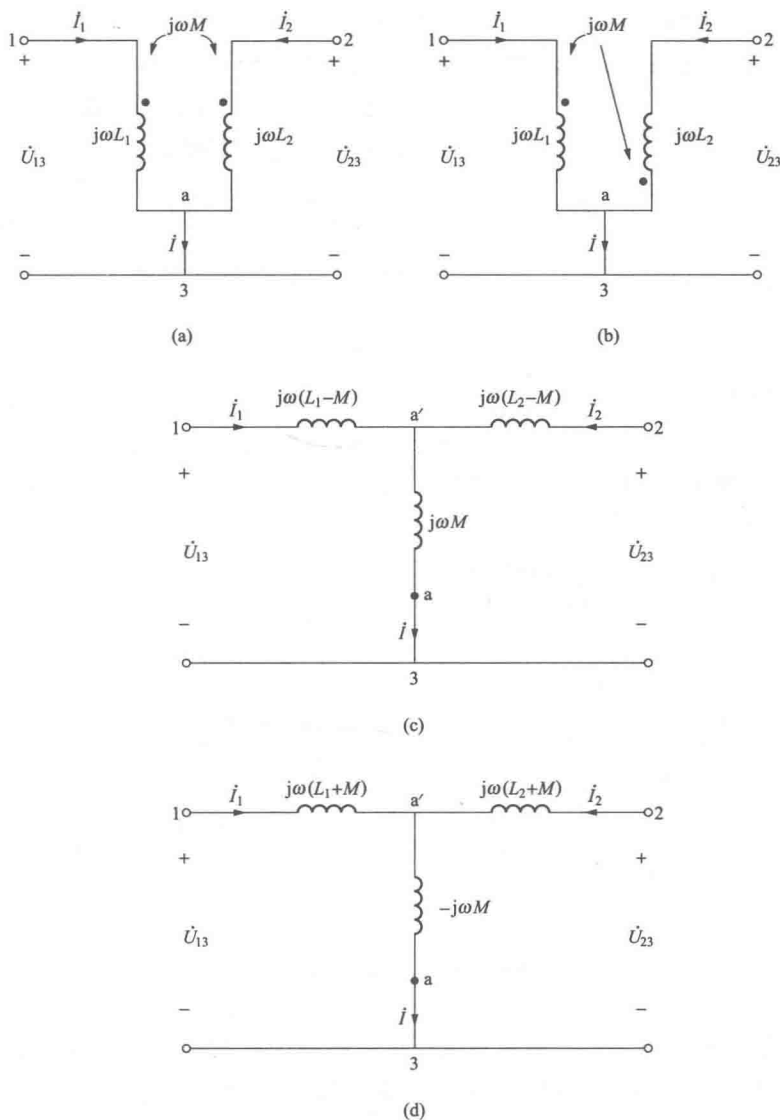


图 1-10 耦合电感 T 型连接及其去耦等效电路

(a) 同名端为共同端; (b) 异名端为共同端; (c) 同名端为共同端时去耦等效电路;
(d) 异名端为共同端时去耦等效电路