

新世纪高职高专教改项目成果教材

电 路 基 础

王慧玲 主 编
刘炳辉 副主编

高等教育出版社

内容提要

本书是新世纪高职高专教改项目成果教材，依据教育部最新制定的《高职高专教育电工技术基础课程教学基本要求》编写而成。

本书主要内容有：电路的基本概念和基本定律、直流电阻性电路的分析、正弦交流电路、三相正弦电路、互感耦合电路、谐振电路、非正弦周期电流电路、线性动态电路分析、二端口网络、磁路与铁心线圈电路等十章内容，还配有精选的例题、思考与练习题和习题。

本书适合高职高专电类专业师生使用，也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电路基础/王慧玲主编. —北京：高等教育出版社，

2004.2

ISBN 7-04-013902-2

I. 电... II. 王... III. 电路理论—高等学校：技术学校—教材 IV. TM13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 004855 号

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街 4 号

邮政编码 100011

总 机 010-82028899

经 销 新华书店北京发行所

印 刷

开 本 787×1092 1/16

印 张 17.75

字 数 430 000

购书热线 010-64054588

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

版 次 年 月第 1 版

印 次 年 月第 次印刷

定 价 20.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

策划编辑	尹 洪
责任编辑	李 刚
封面设计	王凌波
责任绘图	朱 静
版式设计	王艳红
责任校对	杨雪莲
责任印制	

出版说明

为认真贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》和《面向 21 世纪教育振兴行动计划》，研究高职高专教育跨世纪发展战略和改革措施，整体推进高职高专教学改革，教育部决定组织实施《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》（教高〔2000〕3 号，以下简称《计划》）。《计划》的目标是：“经过五年的努力，初步形成适应社会主义现代化建设需要的具有中国特色的高职高专教育人才培养模式和教学内容体系。”《计划》的研究项目涉及高职高专教育的地位、作用、性质、培养目标、培养模式、教学内容与课程体系、教学方法与手段、教学管理等诸多方面，重点是人才培养模式的改革和教学内容体系的改革，先导是教育思想的改革和教育观念的转变。与此同时，为了贯彻落实《教育部关于加强高职高专教育人才培养工作的意见》（教高〔2000〕2 号）的精神，教育部高等教育司决定从 2000 年起，在全国各省市的高等职业学校、高等专科学校、成人高等学校以及本科院校的职业技术学院（以下简称高职高专院校）中广泛开展专业教学改革试点工作，目标是：在全国高职高专院校中，遴选若干专业点，进行以提高人才培养质量为目的、人才培养模式改革与创新为主题的专业教学改革试点，经过几年的努力，力争在全国建成一批特色鲜明、在国内同类教育中具有带头作用的示范专业，推动高职高专教育的改革与发展。

教育部《计划》和专业试点等新世纪高职高专教改项目工作开展以来，各有关高职高专院校投入了大量的人力、物力和财力，在高职高专教育人才培养目标、人才培养模式以及专业设置、课程改革等方面做了大量的研究、探索和实践，取得了不少成果。为使这些教改项目成果能够得以固化并更好地推广，从而总体上提高高职高专教育人才培养的质量，我们组织了有关高职高专院校进行了多次研讨，并从中遴选出了一些较为成熟的成果，组织编写了一批“新世纪高职高专教改项目成果”教材。这些教材结合教改项目成果，反映了最新的教学改革方向，很值得广大高职高专院校借鉴。

新世纪高职高专教改项目成果教材适用于高等职业学校、高等专科学校、成人高校及本科院校举办的二级职业技术学院、继续教育学院和民办高校使用。

高等教育出版社

2002 年 11 月 30 日

前 言

本书是新世纪高职高专教改项目成果教材，是根据教育部制定的《高职高专教育电工技术基础课程教学基本要求》编写的。

高职高专教学改革要求：注重素质教育，注重应用型人才能力的培养，把立足点放在工程技术应用上，课程内容应删繁就简、突出主线、突出重点，做到既为后续课程服务，又能强化工程技术应用能力的培养。

本书在结构、内容安排等方面，吸收了编者多年来在教学改革、教材建设等方面取得的经验，力求全面体现高等职业教育的特点，满足当前教学的需要。

本教材主要特点有：

1. 为适应现代电气电子强、弱电技术互相渗透、融合的发展趋势，以及培养知识面宽、适应性强的复合型人才的要求，本书采用强、弱电知识合一体系。

2. 教材的结构采用模块式，教材整体分为基础模块和选用模块两大部分。基础模块(前四章)是必学模块，其教学要求对于各类学校、不同学制、不同专业基本一致。选用模块(后六章)是在必学模块基础上向专业方向进行的拓展与加深。尽量使两模块之间、各章节之间、各知识点之间构成从易到难、循序渐进的逻辑体系。

3. 体现时代特征，更新教材内容。本教材注意删去老化的知识点，尽量多介绍电气、电子技术领域的有关新知识和技术，使学生能学到新颖的、适用的知识，有利于培养学生创新精神。

4. 根据电路基础课程教学的特点，在内容选取上，重视基本概念、基本定律、基本分析方法的介绍，淡化复杂的理论分析，如对电路的暂态分析，采用分离变量法，避免了微分方程的求解，降低了理论难度。每节之后辅以适量的思考与练习题，并精选了每章的习题。全书内容层次清晰、循序渐进，力求使学生对基本理论能系统、深入地理解，为今后的学习奠定基础，同时注重分析问题、解决问题能力的培养。

5. 强化工程技术应用能力的培养，如：第4章三相电路功率的测量，第5章同名端的测量，第7章非正弦电路的测量，第9章实验参数的测定等，在叙述了电路原理的同时又介绍了具体的测量方法。再如：第6章谐振电路的应用，第7章的滤波器，第8章的微分电路与积分电路等，体现了理论与实际的结合。第10章通过介绍查基本磁化曲线和硅钢片的比损耗，引入了工程手册的图表查法。

6. 本书力求文字深入浅出，通俗易懂，版面设计图文并茂。

7. 体现职教特色，重视实际应用。注重将理论讲授与实践训练相结合，通过配套教材《电路基础实验与综合训练》完成对学生工程素质和动手能力的培养。

8. 本教材参考学时数为90~100学时，各校、各专业可根据自己的实际情况制定教学方案。

本书由王慧玲担任主编，刘炳辉担任副主编，李梅、樊会灵参编。其中王慧玲编写了第5、6、7、8、9章，并参加了第3章的编写；刘炳辉编写了第1、2章；李梅编写了第3、4章；樊会灵编写了第10章。全书由王慧玲统稿。

本教材由薛涛主审，他认真仔细地审阅了全书，并提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚的谢意。

编者

2003年8月

目 录

基础模块

第 1 章 电路的基本概念和基本定律	3	§ 2-10 含受控源电路的分析	65
§ 1-1 电路和电路模型	3	本章小结	69
§ 1-2 电路的基本物理量	4	习题二	70
§ 1-3 电阻元件	9	第 3 章 正弦交流电路	77
§ 1-4 电源元件	12	§ 3-1 正弦交流电的基本概念	77
§ 1-5 基尔霍夫定律	16	§ 3-2 正弦量的相量表示法	81
§ 1-6 电路的工作状态	20	§ 3-3 单一参数正弦交流电路的分析	86
§ 1-7 电路中电位分析	22	§ 3-4 基尔霍夫定律的相量形式	95
本章小结	24	§ 3-5 RLC 串联电路的分析	97
习题一	25	§ 3-6 阻抗的串联与并联	100
第 2 章 直流电阻性电路的分析	30	§ 3-7 用相量法分析正弦交流电路	103
§ 2-1 电阻的串联、并联和混联电路	30	§ 3-8 功率因数的提高	106
§ 2-2 电阻的星形与三角形联结及等效 变换	36	本章小结	108
§ 2-3 电源的联结及两种实际电源模型 的等效变换	39	习题三	109
§ 2-4 支路电流法	44	第 4 章 三相正弦电路	114
* § 2-5 网孔电流法	46	§ 4-1 三相电源及其联结	114
§ 2-6 结点电位法	49	§ 4-2 负载星形联结的三相电路	116
§ 2-7 叠加定理	54	§ 4-3 负载三角形联结的三相电路	121
§ 2-8 戴维宁定理与诺顿定理	57	§ 4-4 三相电路的功率	124
§ 2-9 最大功率传输定理	63	* § 4-5 三相电路功率的测量	126
		本章小结	128
		习题四	129

选用模块

第 5 章 互感耦合电路	133	第 6 章 谐振电路	148
§ 5-1 互感	133	§ 6-1 串联谐振电路	148
§ 5-2 互感线圈的串联、并联	138	§ 6-2 并联谐振电路	151
* § 5-3 空心变压器	143	* § 6-3 谐振电路的频率特性	154
本章小结	144	* § 6-4 谐振电路的应用	159
习题五	145	本章小结	162

习题六	163	本章小结	214
第 7 章 非正弦周期电流电路	165	习题八	216
§ 7-1 非正弦周期量	165	第 9 章 二端口网络	223
§ 7-2 非正弦周期信号的谐波分析	167	§ 9-1 二端口网络的概念	223
§ 7-3 非正弦周期波的有效值、平均值 和功率	173	§ 9-2 二端口网络的基本方程和参数	224
§ 7-4 非正弦周期电压作用下的线性 电路	177	§ 9-3 二端口网络的等效电路	233
* § 7-5 滤波器	178	§ 9-4 二端口网络的阻抗和传输函数	235
本章小结	183	本章小结	239
习题七	184	习题九	241
第 8 章 线性动态电路分析	187	第 10 章 磁路与铁心线圈电路	244
§ 8-1 换路定律	187	§ 10-1 磁场的基本物理量和基本定律 ...	244
§ 8-2 电路初始值与稳态值的计算	190	§ 10-2 铁磁物质的磁化	247
§ 8-3 一阶电路的零输入响应	193	§ 10-3 磁路和磁路定律	252
§ 8-4 一阶电路的零状态响应	197	§ 10-4 恒定磁通磁路的计算	255
§ 8-5 一阶电路的全响应	200	§ 10-5 交流铁心线圈	259
§ 8-6 一阶电路的三要素法	202	§ 10-6 电磁铁	266
* § 8-7 微分电路与积分电路	209	本章小结	269
* § 8-8 <i>RLC</i> 串联电路的零输入响应	211	习题十	271
		参考文献	273

基础模块

第 5 章

互感耦合电路

互感耦合电路是特殊的正弦交流电路，其特殊就在于应考虑电感线圈之间具有磁耦合的影响。磁耦合线圈在电气工程、电子工程、通信工程和测量仪器等方面得到了广泛应用。为了得到实际耦合线圈的电路模型，这里引入互感的概念，并对互感耦合电路的分析进行讨论。本章的基本内容是互感现象、互感和耦合系数、同名端的概念，互感电压与电流的关系，互感线圈的串联、并联连接时等效电感的求算，消去互感法等。

§ 5-1 互 感

一、互感现象

如图 5-1(a) 所示为相互邻近的两个线圈 I、II， N_1 和 N_2 分别表示两线圈的匝数。当线圈 I 有电流 i_1 通过时，产生自感磁通 Φ_{11} 和自感磁链 $\Psi_{11} = N_1 \Phi_{11}$ 。 Φ_{11} 的一部分穿过了线圈 II，这一部分磁通称为互感磁通 Φ_{21} 。同样，在图 5-1(b) 中，当线圈 II 通有电流 i_2 ，它产生的自感磁通 Φ_{22} 的一部分穿过了线圈 I，称为互感磁通 Φ_{12} 。这种由于一个线圈通过电流，所产生的磁通，穿过另一个线圈的现象，叫磁耦合。当 i_1 、 i_2 变化时，引起 Φ_{21} 、 Φ_{12} 的变化，导致线圈 I 与 II 产生互感电压，这就是互感现象。

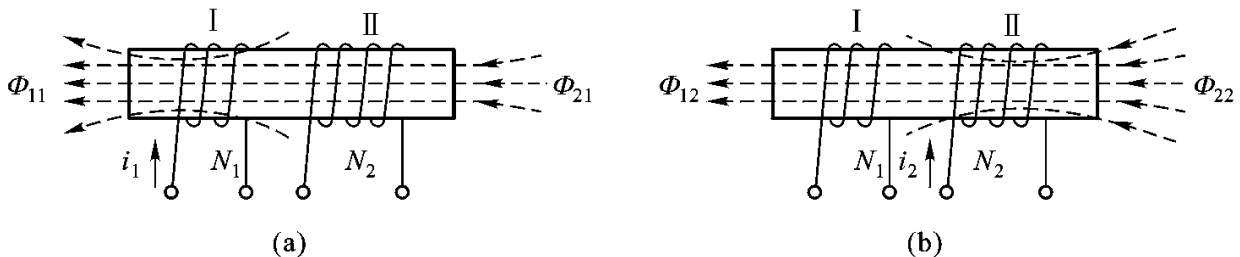


图 5-1 两个线圈的互感

互感现象在电气工程、电子工程、通信工程和测量仪器中应用非常广泛，如：输配电用的电力变压器，测量用的电流互感器、电压互感器，收音机、电视机中的中周振荡线圈等都是根据互感原理制成的。另一方面，互感也会给某些设备的工作带来负面影响，如：电话的串音干

扰就是由于长距离相互平行架设的电线之间的互感造成的。

二、互感系数 M

在图 5-1(a) 所示线圈 II 中，设 Φ_{21} 穿过线圈 II 的所有各匝，则线圈 II 的互感磁链 $\Psi_{21} = N_2 \Phi_{21}$ 。由于 Ψ_{21} 是由线圈 I 中的电流 i_1 产生的，因此 Ψ_{21} 是 i_1 的函数。当线圈周围空间是非铁磁性物质时， Ψ_{21} 与 i_1 成正比。若磁通与电流的参考方向符合右手螺旋定则时，则 $\Psi_{21} = M_{21} i_1$ 。其中 M_{21} 称为线圈 I 对线圈 II 的互感系数，简称互感。

同理，在图 5-1(b) 中，互感磁链 $\Psi_{12} = N_1 \Phi_{12}$ 是由线圈 II 中的电流 i_2 产生，因此 $\Psi_{12} = M_{12} i_2$ 。 M_{12} 称为线圈 II 对线圈 I 的互感。

可以证明， $M_{12} = M_{21}$ ，当只有两个线圈时，可略去下标，用 M 表示，即

$$M = M_{21} = M_{12} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} \quad (5-1)$$

在国际单位制(SI)中， M 的单位名称为亨利，符号为 H。

应当指出：当磁介质为非铁磁性物质时， M 是常数。互感 M 与两个线圈的几何尺寸、匝数、相对位置有关。本章讨论的互感 M 均为常数。

三、耦合系数 k

工程中常用耦合系数 k 表示两个线圈磁耦合的紧密程度，耦合系数定义为

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (5-2)$$

由于互感磁通是自感磁通的一部分，所以 $k \leq 1$ ，当 k 约为零时，为弱耦合； k 近似为 1 时，为强耦合； $k = 1$ 时，称两个线圈为全耦合，此时的自感磁通全部为互感磁通。

两个线圈之间的耦合程度或耦合系数的大小与线圈的结构、两个线圈的相互位置以及周围磁介质的性质有关。如果两个线圈靠得很紧或紧密地绕在一起，如图 5-2(a) 所示，则 k 值可能接近于 1。反之，如果它们相隔很远，或者它们的轴线相互垂直，如图 5-2(b) 所示，线圈 I 所产生的磁通不穿过线圈 II，而线圈 II 产生的磁通穿过线圈 I 时，线圈上半部和线圈下半部磁通的方向正好相反，其互感作用相互抵消，则 k 值就很小，甚至可能接近于零。由此可见，改变或调整它们的相互位置可以改变耦合系数的大小，当 L_1 、 L_2 一定时，也就相应地改变互

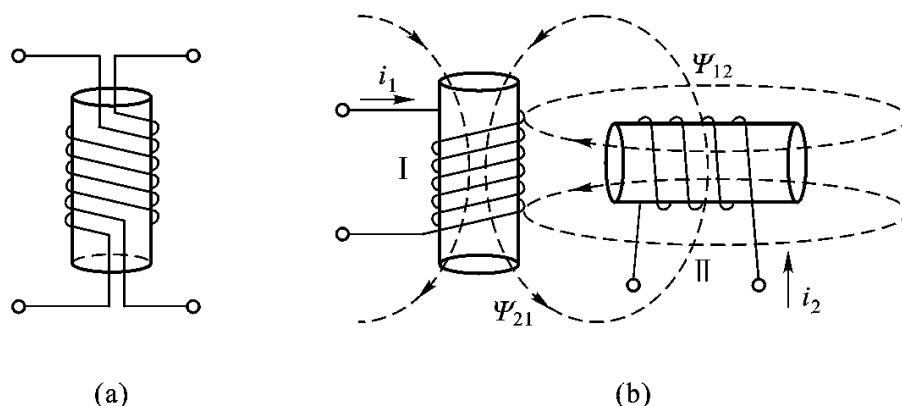


图 5-2 互感线圈的耦合系数与相互位置的关系

感 M 的大小。应用这种原理可制作可变电感器。

在电力、电子技术中，为了利用互感原理有效地传输功率或信号，总是采用极紧密的耦合，使 k 值尽可能接近于 1，通过合理地绕制线圈以及采用铁磁材料作为磁介质可以实现这一目的。

若要尽量减小互感的影响，以避免线圈之间的相互干扰。除合理地布置这些线圈的相互位置可以减小互感的影响外，还可以采用磁屏蔽措施。

四、互感电压

两线圈因变化的互感磁通而产生的感应电势或电压称为互感电势或互感电压。

在图 5-3(a) 中，当线圈 I 中的电流 i_1 变动时，在线圈 II 中产生了变化的互感磁链 Ψ_{21} ，而 Ψ_{21} 的变化将在线圈 II 中产生互感电压 u_{M2} 。如果选择电流 i_1 的参考方向以及 u_{M2} 的参考方向与 Ψ_{21} 的参考方向都符合右手螺旋定则时，有以下关系式：

$$u_{M2} = \frac{d\Psi_{21}}{dt} = M \frac{di_1}{dt} \quad (5-3)$$

同理，在图 5-3(b) 中，当线圈 II 中的电流 i_2 变动时，在线圈 I 中也会产生互感电压 u_{M1} ，当 i_2 与 Ψ_{12} 以及 Ψ_{12} 与 u_{M1} 的参考方向均符合右手螺旋定则时，有以下关系式：

$$u_{M1} = \frac{d\Psi_{12}}{dt} = M \frac{di_2}{dt} \quad (5-4)$$

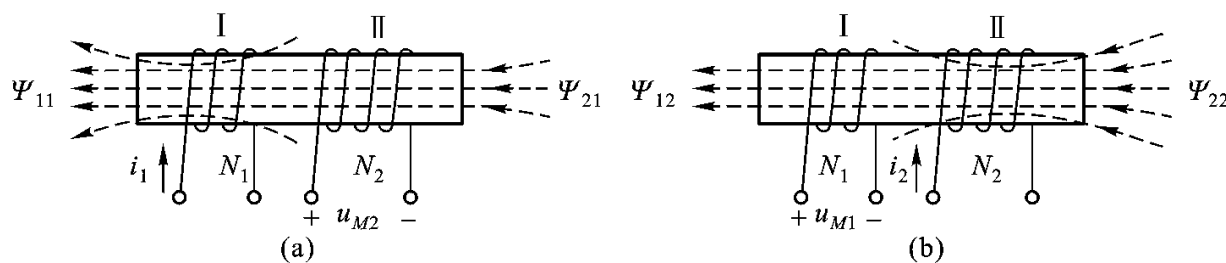


图 5-3 互感线圈的电压与电流

可见，互感电压与产生它的相邻线圈电流的变化率成正比。

当两线圈中通入正弦交流电流时，互感电压与电流的相量关系表示为

$$\dot{U}_{M2} = j\omega M \dot{I}_1 = jX_M \dot{I}_1 \quad (5-5)$$

$$\dot{U}_{M1} = j\omega M \dot{I}_2 = jX_M \dot{I}_2 \quad (5-6)$$

式中， $X_M = \omega M$ 具有电抗的性质，称为互感电抗，单位与自感电抗相同是欧姆 (Ω)。式(5-5)和式(5-6)表明互感电压的大小及相位关系为

$$U_{M2} = \omega M I_1$$

$$U_{M1} = \omega M I_2$$

$$u_{M2} \text{ 较 } i_1 \text{ 超前 } 90^\circ$$

$$u_{M1} \text{ 较 } i_2 \text{ 超前 } 90^\circ$$

五、互感线圈的同名端

在工程中，对于两个或两个以上有电磁耦合的线圈，常常要知道互感电压的极性。如： LC 正弦振荡器中，必须正确地连接互感线圈的极性，才能产生振荡。然而互感电压的极性与电流（或磁通）的参考方向及线圈的绕向有关。但在实际情况下，线圈往往是密封的，看不到绕向，并且在电路图中绘出线圈的绕向是很不方便的，采用标记同名端的方法可解决这一问题。

工程上将两个线圈通入电流，按右螺旋产生相同方向磁通时，两个线圈的电流流入端称为同名端，用符号“·”或“*”等标记。如图 5-4 所示，线圈 I 的“1”端点与线圈 II 的“2”端点（1' 与 2'）为同名端。采用同名端标记后，就可以不用画出线圈的绕向，如图 5-4(a) 所示的两个互感线圈，用图 5-4(b) 所示互感电路符号表示。

采用同名端标记后，互感电压的方向可以由电流对同名端的方向确定，即互感电压与产生它的电流对同名端的参考方向一致。图 5-4(b) 中，线圈 I 中的电流 i_1 是由同名端流向非同名端；在线圈 II 中产生的互感电压 u_{M2} 也是由同名端指向非同名端。

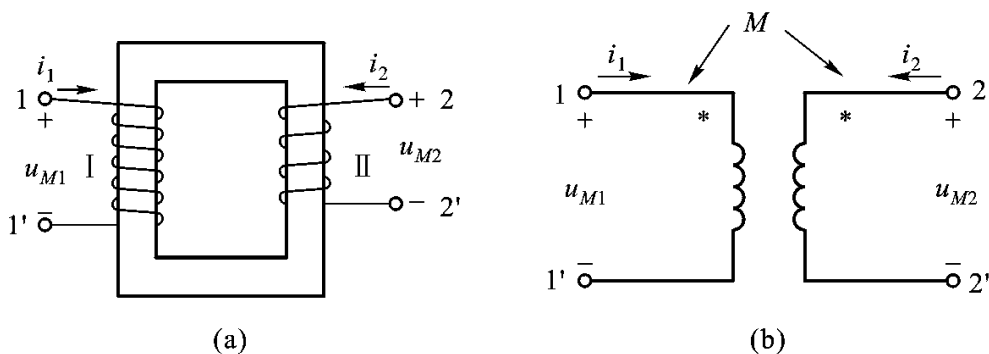


图 5-4 互感线圈的同名端及互感的电路符号

例 5-1 电路如图 5-5 所示。试判断同名端。

解：根据同名端的定义，图 5-5(a) 中，2、4、5 为同名端或 1、3、6 为同名端。图 5-5(b) 中，1、3 为同名端或 2、4 为同名端。

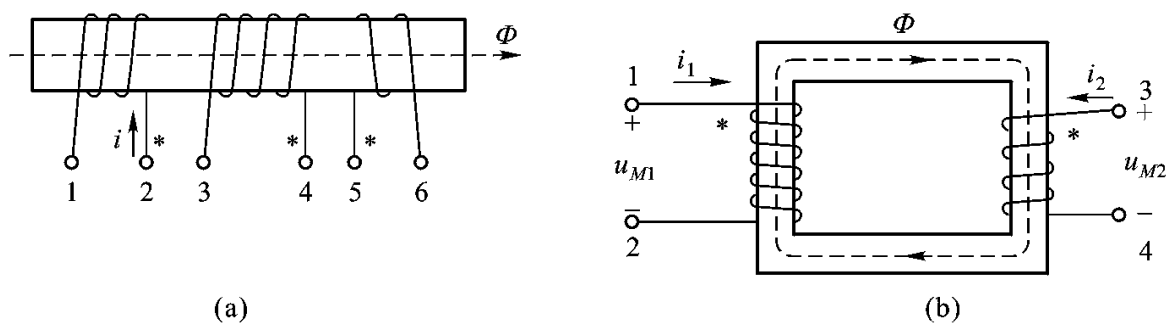


图 5-5 判断线圈的同名端

例 5-2 电路如图 5-6 所示，两线圈之间的互感 $M = 0.08 \text{ H}$ ， $i_1 = 10\sin(1000t) \text{ A}$ ，试求互感电压 u_2 。

解：图示电路中 i_1 及 u_2 的参考方向对同名端是一致的，因此

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt} = 0.08 \times \frac{d}{dt} [10\sin(1000t)]$$

$$= 800\cos(1\,000t)\text{V} = 800\sin(1\,000t + 90^\circ)\text{V}$$

如利用相量关系式求解，则

$$\dot{U}_2 = j\omega M \dot{I}_1 = j1\,000 \times 0.08 \times \frac{10}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ \text{V} = \frac{800}{\sqrt{2}} \angle 90^\circ \text{V}$$

根据求得的相量写出对应的正弦量为

$$u_2 = 800 \sin(1\,000t + 90^\circ)\text{V}$$

根据同名端与互感电压参考方向标注原则。在实际工作中，可利用实验方法判别同名端。实际工作中常用的判别方法有两种：直流判别法和交流判别法。

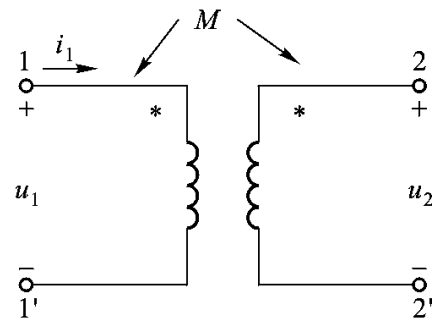


图 5-6 例 5-2 图

1. 直流判别法

直流判别法是依据同名端定义以及互感电压参考方向标注原则而归纳出的一种实用方法。其判别方法如下：

电路如图 5-7 所示，两磁耦合线圈的绕向未知，但当 S 合上的瞬间，电流从 1 端流入，此时若电压表指针正偏，说明 3 端为高电位端，因此 1、3 为同名端；若电压表指针反偏，说明 4 端为高电位端，即 1、4 端为同名端。

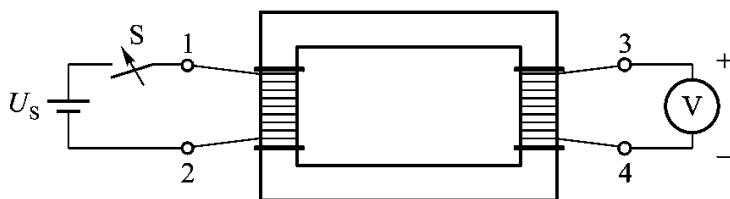


图 5-7 直流法判断同名端

2. 交流判别法

交流判别法是依据互感线圈串联原理(参见 § 5-2)，在工程上有广泛应用。如果没有电压表，也可用普通灯泡代替，道理一样。其判别方法如下：

把两个线圈的任意两个接线端连在一起，例如将 1、3 相连，并在其中一个线圈上加上一个较低的交流电压，用交流电压表分别测量 U_{12} 、 U_{34} 、 U_{24} ，如图 5-8 所示，当 U_{24} 约等于 U_{12} 和 U_{34} 之差，则 1、3 为同名端；若测得 U_{24} 约等于 U_{12} 和 U_{34} 之和，则 1、3 为异名端。

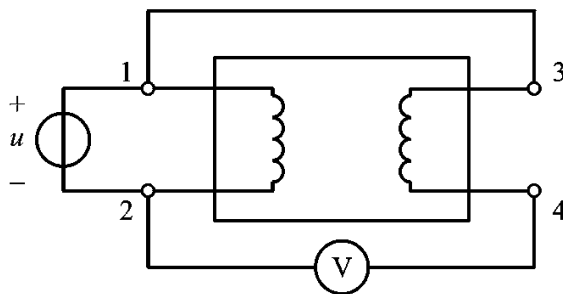


图 5-8 交流法判断同名端

思考与练习题

5-1-1 互感系数 M 的大小与哪些因素有关？

5-1-2 为了使收音机中的电源变压器与输出变压器彼此不发生互感现象，即 $k = 0$ ，应采取什么措施？

5-1-3 两耦合线圈的 $L_1 = 0.01\text{H}$ 、 $L_2 = 0.04\text{H}$ 、 $M = 0.01\text{H}$ ，试求其耦合系数 k 。

5-1-4 对两个互感线圈同名端进行测试，其中一个线圈加上低压交流 U_1 ，串接两个互感线圈并测量其总电压，当电压表读数 $U_1 > U_2$ ，试问相接的两个端钮是否为同名端？

§ 5-2 互感线圈的串联、并联

一、互感线圈的串联

具有互感的两线圈有两种串联方式——顺向串联和反向串联。

两个互感线圈流过同一电流，且电流都是由线圈的同名端流入(出) 即异名端相接)，这种连接方式称为顺向串联。根据基尔霍夫电压定律，当电流与电压参考方向如图 5-9(a) 所示时，线圈 I 两端的电压为

$$u_1 = u_{L1} + u_{M1} = L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}$$

上式包含两项：一项是电流 i 所产生的自感电压 $u_{L1} = L_1 \frac{di}{dt}$ ；另一项是电流 i 通过线圈 II 时在线圈 I 中所产生的互感电压 u_{M1} 。由于 u_{M1} 的参考方向与产生它的电流 i 对同名端是一致的，所以 $u_{M1} = M \frac{di}{dt}$ ；又由于 u_{M1} 与 u_1 的参考方向一致，所以 u_{M1} 前面取正号。

同理，线圈 II 两端的电压为

$$u_2 = u_{L2} + u_{M2} = L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}$$

式中， $u_{M2} = M \frac{di}{dt}$ 为电流 i 通过线圈 I 时在线圈 II 中所产生的互感电压。

电路的总电压为

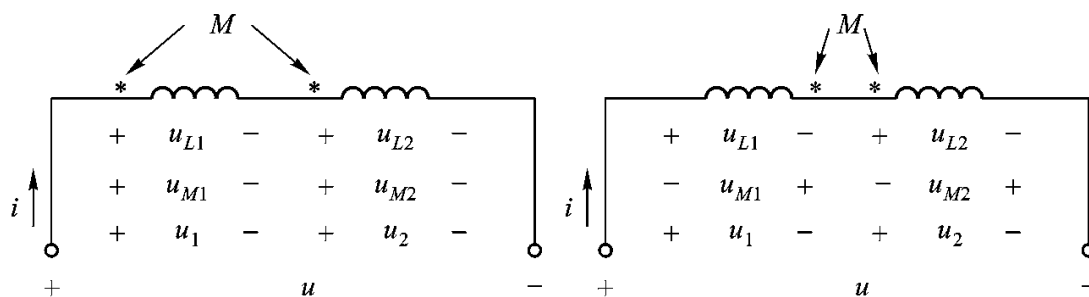
$$u = u_1 + u_2 = (L_1 + L_2 + 2M) \frac{di}{dt} = L_s \frac{di}{dt}$$

其中

$$L_s = L_1 + L_2 + 2M \quad (5-7)$$

为顺向串联时两线圈的等效电感。

当两线圈如图 5-9(b) 所示连接时，电流都是由线圈的异名端流入(或流出) 即同名端相接)，这种连接方式称为反向串联。同理，可推出反向连接时两线圈的等效电感为



(a) 互感线圈的顺向串联

(b) 互感线圈的反向串联

图 5-9 具有互感的两线圈的两种串联方式

$$L_f = L_1 + L_2 - 2M \quad (5-8)$$

由上述分析可见，当互感线圈顺向串联时，等效电感增加；反向串联时，等效电感减小，有削弱电感的作用。由于互感磁通是自感磁通的一部分，所以 $(L_1 + L_2) > 2M$ ，即 $L_f > 0$ ，因此全电路仍为感性。

在电源电压不变的情况下，顺向串联，电流减小；反向串联电流增加。

例 5-3 电路如图 5-10 所示。已知 $L_1 = 1 \text{ H}$ 、 $L_2 = 2 \text{ H}$ 、 $M = 0.5 \text{ H}$ 、 $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ 、 $u_S = 100\sqrt{2}\sin(628t) \text{ V}$ 。试求电流 i 。

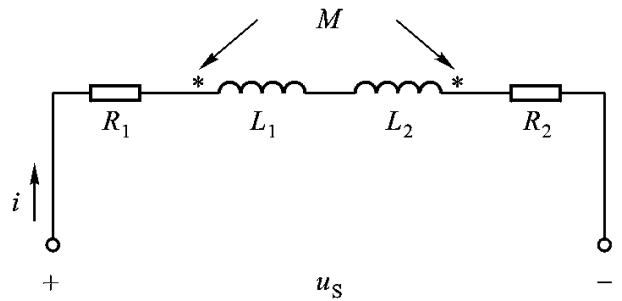


图 5-10 例 5-3 图

解：方法一 因为两个线圈是反向串联，故得

$$X_M = \omega(L_1 + L_2 - 2M) = 628 \times (1 + 2 - 2 \times 0.5) \Omega = 1256 \Omega$$

$$|Z| = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + X_M^2} = \sqrt{2000^2 + 1256^2} \Omega = 2362 \Omega$$

$$\varphi = \arctan \frac{X_M}{R} = \arctan \frac{1256}{2000} = 32.1^\circ$$

$$I = \frac{U}{|Z|} = \frac{100}{2362} \text{ A} = 42.3 \text{ mA}$$

$$\varphi_i = \varphi_u - \varphi = 0 - 32.1^\circ = -32.1^\circ$$

$$i = 42.3\sqrt{2} \sin(628t - 32.1^\circ) \text{ mA}$$

方法二 利用相量关系式求解

$$Z = R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M) = 2000 \Omega + j628(1 + 2 - 2 \times 0.5) \Omega = 2000 \Omega + j1256 \Omega = 2362 \angle 32.1^\circ \Omega$$

又因为 $\dot{U}_S = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$

所以 $\dot{I} = \frac{\dot{U}_S}{Z_i} = \frac{100 \angle 0^\circ}{2362 \angle 32.1^\circ} \text{ A} = 42.3 \angle -32.1^\circ \text{ mA}$

$$i = 42.3\sqrt{2} \sin(628t - 32.1^\circ) \text{ mA}$$

例 5-4 电路如图 5-11 所示。已知 $\dot{U}_{ab} = 100 \angle 0^\circ$ ， $R_1 = R_2 = 3 \text{ k}\Omega$ 、 $\omega L_1 = \omega L_2 = 4 \text{ k}\Omega$ 、 $\omega M = 2 \text{ k}\Omega$ 。求 cd 两端的开路电压 U_{cd} 。

解：当 cd 两端开路时，线圈 2 中无电流，因此，在线圈 1 中无互感电压。

所以 $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{ab}}{R_1 + j\omega L_1} = \frac{100 \angle 0^\circ}{3000 + j4000} \text{ A} = 20 \angle -53.1^\circ \text{ mA}$

由于线圈 2 中无电流，所以线圈 1 中无自感电压。

但由于 L_1 上有电流，所以线圈 2 中有互感电压，根据电流对同名端的方向可知，当 cd 两端的电压

$$\begin{aligned} \dot{U}_{cd} &= \dot{U}_{M2} + \dot{U}_{ab} = j\omega M \dot{I}_1 + \dot{U}_{ab} \\ &= j2 \times 20 \angle -53.1^\circ \text{ V} + 100 \angle 0^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

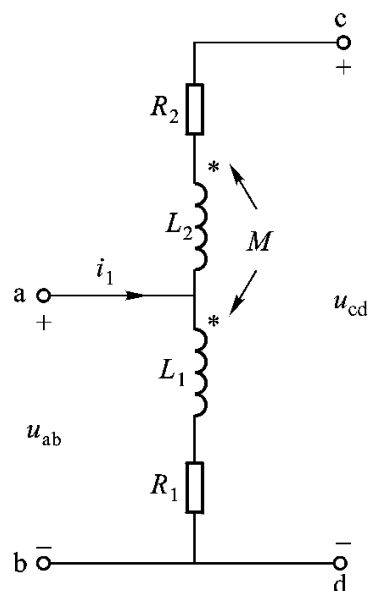


图 5-11 例 5-4 图

$$= 40 \angle 36.9^\circ \text{ V} + 100 \angle 0^\circ \text{ V} = 134.1 \angle 10.3^\circ \text{ V}$$

二、互感的线圈并联

具有互感的两线圈并联时，也有两种接法：一种是同名端在同一侧，称为同侧并联；另一种是同名端在异侧，称为异侧并联，分别如图 5-12(a)(b)所示。

下面分别对两种不同接法的电路进行分析。

当两个互感线圈同侧并联时，各量的参考方向如图 5-12 所示，应用相量形式，根据基尔霍夫定律列出如下：

$$\text{对于支路 1} \quad \dot{U} = j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2$$

$$\text{对于支路 2} \quad \dot{U} = j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega M \dot{I}_1$$

现将 $\dot{i} = \dot{i}_1 + \dot{i}_2$ 代入上述方程，可得

$$\dot{U} = j\omega (L_1 - M) \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}$$

$$\dot{U} = j\omega (L_2 - M) \dot{I}_2 + j\omega M \dot{I}$$

由上面的式子不难看出，可以用图 5-13(a)所示电路来代替图 5-12(a)电路。图 5-13(a)是图 5-12(a)消去互感后的等效电路，对于这个电路，可以使用无互感的正弦交流电路的分析方法进行计算。其阻抗值为

$$Z = j\omega M + \frac{j\omega (L_1 - M) \cdot j\omega (L_2 - M)}{j\omega (L_1 + L_2 - 2M)} = j\omega \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M} = j\omega L_{tc}$$

其中 L_{tc} 为互感线圈同侧并联的等效电感，即

$$L_{tc} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M} \quad (5-9)$$

同理， L_{yc} 为互感线圈异侧并联的等效电感，即

$$L_{yc} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M} \quad (5-10)$$

比较式(5-9)和式(5-10)可知，同名端相接(同侧并联)时，耦合电感并联的等效电感较大；反之，异名端相接(异侧并联)时，则等效电感较小。因此，应注意同名端的连接对等效电路参数的影响。

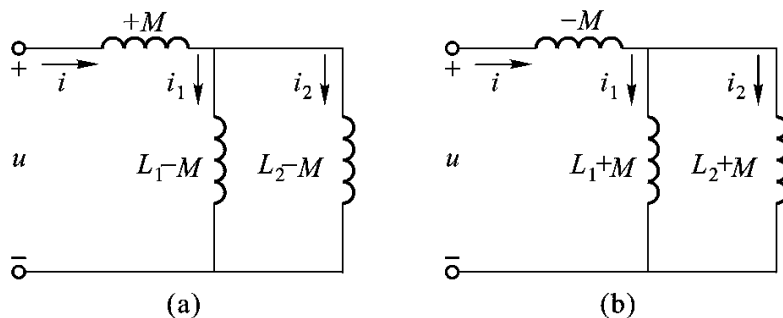


图 5-13 消去互感后的电路