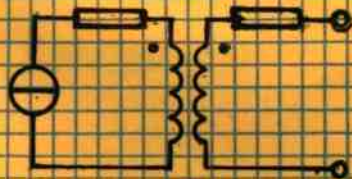


邮·电·中·等·专·业·学·校·教·材

电路基础(修订本) 下册

吴承甲 陈毓琮 编 吴承甲 修订



人民邮电出版社

邮电中等专业学校教材

电 路 基 础

(修订本)

下 册

吴承甲 陈毓琮 编

吴承甲 修订

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书分上、下两册。上册内容是：电路的基本概念和基本定律，简单电路的分析，线性网络的分析方法和定理，电容元件和电感元件，正弦交流电路和谐振电路。下册内容是：互感电路，三相电路，非正弦周期电流电路，磁路，变压器和过渡过程。

本书为邮电中专通信各专业的教材，也可作为其他同类中专学校教材以及电信工程技术人员参考。

邮电中等专业学校教材

电 路 基 础

(修订本)

下 册

吴承甲 陈毓琮 编

吴承甲 修订

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京朝阳门内南竹杆胡同111号

人民邮电出版社河北印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开本：787×1092 1/32 1993年 6 月 第 一 版

印张：9.375 页数：150 1996年 7 月河北第 2 次印刷

字数：213 千字 印数：31 001—39 000 册

ISBN 7-115-04820-7/G · 209

定价：10.00元

前 言

本书是邮电中等专业学校用书。为了适应邮电教育事业发展的需要，我局自1978年以来，先后成立了邮电中专教材编审委员会及基础课和专业课教材编审组（或小组），全面开展了教材编审活动。到目前为止第一轮邮电中专试用教材已基本上出齐。自1982年开始了各编审组（或小组）对试用几年的教材进行了总结，对原教学大纲进行了修订，并在此基础上，对各课程的邮电中专试用教材作了比较全面的修改和补充，以适应当前邮电技术的发展。我们在几年内，将修改后的教材陆续出版，以满足邮电中等专业学校的教学需要。编写教材，是提高教学质量的关键。我们组织编写本教材时，力求以马列主义、毛泽东思想为指导，努力运用辩证唯物主义的观点阐明科学技术的规律，内容上注意了少而精，尽量反映科学技术的新成就。书内难免存在缺点和错误。希望有关教师和学生在使用过程中，把发现的问题提给我们以便修改提高。

邮电部教育局

编 者 的 话

本书是按照邮电中专新修订的教学大纲编写的，并作为邮电通信各专业的技术基础课教材。

在编写本书的过程中，既注意吸取原邮电中专“电路基础”一书的特点，又结合了几年的教学实践，作了比较全面的修改和补充，尤其增加了一些新的内容，使本书更适合目前邮电中专的教学需要和学生的学习。

本书分上、下两册。上册共六章，着重讲述直流、交流电路的基本概念、分析和计算方法，以及谐振电路原理。下册共六章，着重讲叙互感电路、非正弦周期电流电路、变压器以及过渡过程。为了便于教学和学习的要求，在各章节中都编入了相应的例题、思考题和练习题，而且每章末还附有习题，作补充内容供教学选用。为了便于自学者的查阅，书后附有习题答案。

本书在编写过程中，力求内容深入浅出，通俗易懂，着重于物理概念的讲解，尽量避免作繁琐的数学推导。因此，本书也适合于从事电信、电子技术工程技术人员阅读。

原书由陈毓琮、吴承甲等编写，本书由吴承甲修订。在编写过程中，邮电中专“电路基础”教学指导小组对书稿作过几次审查，并提出许多宝贵意见。在此谨表示感谢。

由于我们水平有限，实践经验不足，时间仓促，难免存在缺点和错误，恳切希望批评指正。

编者1992.7

目 录

第七章 互感电路	(1)
§ 7-1 互感系数和耦合系数.....	(1)
§ 7-2 互感电压.....	(4)
§ 7-3 互感线圈的同名端.....	(5)
§ 7-4 互感消除法.....	(14)
§ 7-5 具有互感的线圈串联和并联.....	(17)
§ 7-6 具有互感的正弦电路的计算.....	(23)
§ 7-7 空心变压器.....	(30)
小结.....	(39)
习题.....	(40)
第八章 三相电路	(45)
§ 8-1 三相电源.....	(45)
§ 8-2 三相负载的星形联接.....	(52)
§ 8-3 三相负载的三角形联接.....	(61)
§ 8-4 三相电路的功率.....	(67)
小结.....	(70)
习题.....	(71)
第九章 非正弦周期电流电路	(74)
§ 9-1 非正弦周期信号.....	(74)
§ 9-2 周期信号的傅立叶级数.....	(78)
§ 9-3 非正弦周期信号的有效值.....	(94)
§ 9-4 非正弦周期电流电路的功率.....	(96)

§ 9-5 非正弦交流电路的计算.....	(99)
§ 9-6 非周期信号分析.....	(106)
小结.....	(110)
习题.....	(110)
第十章 磁路	(114)
§ 10-1 磁场的基本物理量.....	(114)
§ 10-2 全电流定律及其应用.....	(119)
§ 10-3 磁化曲线和磁滞回线.....	(126)
§ 10-4 在交变磁通下的铁芯损失.....	(135)
§ 10-5 铁磁性材料的分类.....	(138)
§ 10-6 磁路及其计算.....	(142)
§ 10-7 磁屏蔽.....	(153)
小结.....	(154)
附录 平行直导线电感量的计算.....	(156)
第十一章 变压器	(158)
§ 11-1 交流电路中的铁芯线圈.....	(158)
§ 11-2 变压器的构造和工作原理.....	(164)
§ 11-3 理想变压器.....	(167)
§ 11-4 全耦合变压器.....	(177)
§ 11-5 实际变压器.....	(183)
§ 11-6 变压器的频率特性.....	(187)
§ 11-7 特殊变压器.....	(190)
小结.....	(195)
习题.....	(197)
附录 L_{S1} 、 L_{S2} 、 L 、 n 与 L_1 、 L_2 、 M 电路的等效 ..	(198)
第十二章 过渡过程	(203)
§ 12-1 换路定则.....	(204)

§ 12-2	一阶电路的零输入响应·····	(211)
§ 12-3	一阶电路对恒定激励的零状态响应·····	(223)
§ 12-4	一阶电路的全响应·····	(235)
§ 12-5	一阶电路的三要素法·····	(246)
§ 12-6	单位阶跃函数和一阶电路的阶跃响应·····	(255)
§ 12-7	微分电路与积分电路·····	(265)
§ 12-8	LC电路中的自由振荡·····	(272)
§ 12-9	RLC串联电路的过渡过程·····	(275)
小结	·····	(280)
习题	·····	(281)
习题答案	·····	(286)

第七章 互感电路

当一个线圈通过变化的电流 i 时，则变化的电流所产生的变化的磁通将在本线圈中产生感应电压(自感电压) $u = L \frac{di}{dt}$ 。

如果在一个线圈的邻近还有另一个线圈，则每一线圈的电流所产生的磁通，不仅与本线圈交链形成自感磁链，还将有一部分与邻近的线圈交链，因此当电流变化而引起磁通变化时，它不仅在本线圈内产生自感电压，同时在邻近的线圈中也要产生感应电压，称为互感电压。这种由于一个线圈中电流的变化而在其他线圈中产生感应电压的现象称为互感现象。这样的两个线圈称为互感线圈。

本章主要讨论互感线圈中电压和电流的关系，具有互感的正弦交流电路的分析计算以及空心变压器的初步概念。

§ 7-1 互感系数和耦合系数

一、互感系数

图7-1-1给出两个有磁耦合的线圈，其匝数分别为 N_1 和 N_2 。设通过线圈①的电流为 i_1 ，它所产生的磁通为 ϕ_{11} ，其中一部分穿过线圈②，用 ϕ_{12} 表示。 ϕ_{12} 称为互感磁通。如果 ϕ_{12} 与线圈②的每一匝都交链，则互感磁链为

$$\Psi_{12} = N_2 \phi_{12}$$

同理，当电流 i_2 通过线圈②时，产生磁通 ϕ_{22} ，其中一部

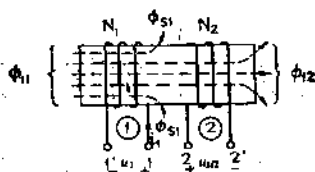


图 7-1-1 有磁耦合的两个线圈

分 ϕ_{21} 穿过线圈①， ϕ_{21} 与线圈①交链形成互感磁链

$$\Psi_{21} = N_1 \phi_{21}$$

如果线圈周围没有铁磁性物质时，则互感磁链与产生它的电流成正比，其比例系数用 M_{12} 和 M_{21} 表示，则有

$$\left. \begin{aligned} M_{12} &= \frac{\Psi_{12}}{i_1} \\ M_{21} &= \frac{\Psi_{21}}{i_2} \end{aligned} \right\} \quad (7-1-1)$$

M_{12} 、 M_{21} 称为线圈①与线圈②之间的互感系数，简称互感，是与各线圈中电流无关的常量。互感的单位是亨利(H)。

可以证明(证明从略)， $M_{12} = M_{21}$ ，因此今后当只有两个互相耦合的线圈存在时，便可略去下标而一律用 M 这一符号。

当线圈周围没有铁磁性物质时，互感 M 的大小只和两线圈的几何尺寸、线圈的匝数、相互位置以及线圈附近媒质的导磁系数有关。

二、耦合系数

在一般情况下，一个线圈中所产生的磁通只有一部分与邻近的线圈相交链，还有一部分则没有和邻近的线圈相交链(如

图7-1-1中的 ϕ_{11}), 这一部分磁通称为漏磁通。漏磁通越少, 两线圈之间的耦合程度就越紧密。两个线圈之间耦合的紧密程度通常用耦合系数 k 来表示。耦合系数定义为两线圈之间的互感 M 与各自电感 L_1 、 L_2 的几何平均值($\sqrt{L_1 L_2}$)的比值, 即

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (7-1-2)$$

现在来说明(7-1-2)式的意义。根据定义有

$$L_1 = \frac{N_1 \phi_{11}}{i_1}, \quad L_2 = \frac{N_2 \phi_{22}}{i_2}$$

$$M_{12} = \frac{N_2 \phi_{12}}{i_1}, \quad M_{21} = \frac{N_1 \phi_{21}}{i_2}$$

因为 $M_{12} = M_{21} = M$, 所以

$$\begin{aligned} k^2 &= \frac{M^2}{L_1 L_2} = \frac{M_{12} \cdot M_{21}}{L_1 L_2} \\ &= \frac{\frac{N_2 \phi_{12}}{i_1} \cdot \frac{N_1 \phi_{21}}{i_2}}{\frac{N_1 \phi_{11}}{i_1} \cdot \frac{N_2 \phi_{22}}{i_2}} \\ &= \frac{\phi_{12} \phi_{21}}{\phi_{11} \phi_{22}} \end{aligned}$$

即

$$k = \sqrt{\frac{\phi_{12} \phi_{21}}{\phi_{11} \phi_{22}}}$$

由于互感磁通一般只是自感磁通的一部分, 因此有 $\phi_{12} < \phi_{11}$, $\phi_{21} < \phi_{22}$, 所以 $k < 1$; 只有当 $\phi_{12} = \phi_{11}$, $\phi_{21} = \phi_{22}$ 时, $k = 1$, 这一理想情况称为全耦合。耦合系数 k 反映了磁通相耦

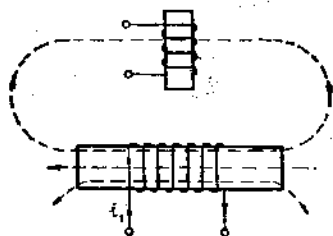


图 7-1-2 两个相互垂直放置的线圈

合的程度， k 值越大表示漏磁通越少，即两个线圈之间耦合越紧密。

耦合系数 k 的大小与两线圈的相对位置有关。如果两个线圈靠得很近且互相平行或紧密绕在一起，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7-1-2所示，则 k 值就很小，甚至可能接近于零。由此可见，当 L_1 、 L_2 一定时，改变它们的相互位置可以改变耦合系数的大小，也就相应地改变互感 M 的大小。

§ 7-2 互感电压

在图7-1-1所示的线圈①中，当电流 i_1 变动时，则互感磁通 ϕ_{12} 将在线圈②中产生互感电压 u_{M2} 。如果选择 u_{M2} 的参考方向（亦即沿绕组电压降的参考方向）和 ϕ_{12} 的参考方向符合右手螺旋法则，根据电磁感应定律，则有

$$u_{M2} = - \frac{d\psi_{12}}{dt} \quad (7-2-1)$$

同理，如果变动的电流 i_2 通过线圈②，则在线圈①中也将产生感应电压 u_{M1} 。按照右手螺旋法则选定 u_{M1} 与 ϕ_{21} 的参考方向时，同样有

$$u_{M1} = \frac{d\psi_{21}}{dt} \quad (7-2-2)$$

由(7-1-1)式可得 $\psi_{12} = Mi_1$ ， $\psi_{21} = Mi_2$ ，代入(7-2-1)式和(7-2-2)式则得

$$u_{M2} = M \frac{di_1}{dt} \quad (7-2-3)$$

$$u_{M1} = M \frac{di_2}{dt} \quad (7-2-4)$$

在正弦电流的情况下，互感电压可以用相量来表示，即

$$\dot{U}_{M2} = j\omega M \dot{I}_1 = jX_M \dot{I}_1 \quad (7-2-5)$$

$$\dot{U}_{M1} = j\omega M \dot{I}_2 = jX_M \dot{I}_2 \quad (7-2-6)$$

由此可见，互感电压与产生它的电流之间存在着相位正交的关系。

§ 7-3 互感线圈的同名端

在研究自感现象时，由于线圈交链的自感磁通是由流过线圈本身的电流所产生的，而在选择线圈中电流的参考方向和磁通的参考方向时，总是使它们符合右手螺旋法则，这样在选取关联的电压、电流参考方向时，电压的参考方向和磁通的参考方向也符合右手螺旋法则。自感电压总可以用 $u = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt}$ 来表示，而不必考虑线圈的实际绕向（参阅上册 § 4-6）。但

对两个耦合的线圈来说,情况就有所不同。在图7-1-1中,产生互感电压 u_{M2} 的互感磁链 Ψ_{12} 是由线圈①中的电流 i_1 产生的,所以 Ψ_{12} 与 u_{M2} 的参考方向是否符合右手螺旋法则,这还要根据线圈②的绕向来确定。当 Ψ_{12} 与 u_{M2} 的参考方向符合右手螺旋法则时,则 $u_{M2} = +M \frac{di_1}{dt}$,公式右端带正号;反之, u_{M2} 公式右端将带负号,即 $u_{M2} = -M \frac{di_1}{dt}$ 。(参见图7-3-1)。由此可见,要判别互感电压公式右端是带正号还是带负号,就必须知道两线圈的绕向。这个结论对 i_2 产生的互感电压 u_{M1} 也同样适用。

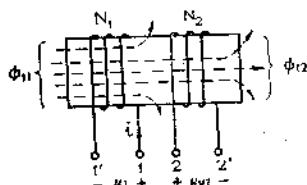


图 7-3-1 互感电压的正负

要求在电路图中绘出线圈绕向是很不方便的,通常采用标记同名端(又称对应端)的方法来表明两线圈的绕向关系。标记同名端的原理是:当两个线圈的电流同时由同名端流进(或流出)线圈时,则两个电流所产生的磁通相互增强。以图7-3-2(a)所示的互感线圈为例,如果电流 i_1 和 i_2 分别从a端和c端流入,则对每个线圈来说,自感磁通和互感磁通的方向都是一致的,即两个电流所产生的磁通是相互加强的,a、c两个端钮就叫做线圈①和②的同名端。同名端一般用小圆点(·)或用星号(*)标记。显然,不标圆点的两个端钮b和d也是同名端,而a端和d端则不是同名端,一般称为异名端。图7-3-2还示出了标记同名端的另外两个例子。

如果有两个以上的线圈彼此之间有磁耦合,则同名端应当

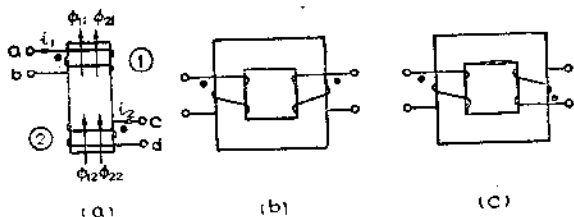


图 7-3-2 互感线圈的同名端

一对一对地加以标记（每一对须用不同的符号）。

当互感线圈的同名端确定后，互感电压表达式右端的正负号也就易于判别的。例如在图7-3-3所示电路中*，若选定线圈①的电流 i_1 的参考方向由a端流入，根据同名端标记的原则，若有电流 i_2 由线圈②的c端流入（注意c端和a端是同名端），则 i_2 所产生的磁通将与 i_1 产生的互感磁通 ϕ_{12} 的方向一致，也就是说， i_2 的参考方向将与互感磁通 ϕ_{12} 的参考方向成右螺旋关系。如果选定互感电压 u_{M2} 的参考方向与电流 i_2 的参考方向一致，即选定c端为 u_{M2} 的参考正极，则互感电压 u_{M2} 的参考方向就与产生它的互感磁通 ϕ_{12} 的参考方向成右螺旋关系，于是互感电压表达式的右端带正号，

即

$$u_{M2} = +M \frac{di_1}{dt}$$

综上所述，当电流的参考方向和由它产生的互感电压的参考方向对同名端一致（即均由线圈的同名端指向另一端）时，则

$$u_u = +M \frac{di}{dt}$$

*在本章 §7-3~§7-6 各节的讨论中，线圈都设为理想的，即线圈无损耗也无电场的作用，因此用电感元件作为线圈的电路模型。

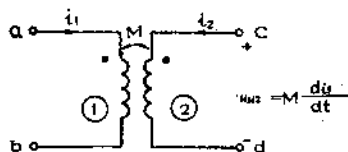


图 7-3-3 电流和互感的参考方向

否则

$$u_M = -M \frac{di}{dt}$$

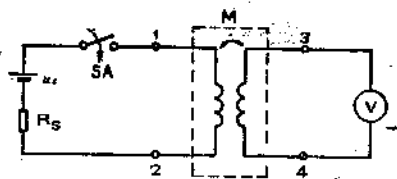
因此根据同名端以及选定的电流、互感电压的参考方向便可正确地写出互感电压的表达式，而不必知道线圈的具体绕向。

判断互感线圈的同名端，在理论和实际问题中都很重要。但在实际情况下，线圈往往是密封的，线圈绕向无法知道。在这种情况下，可用实验的方法来判断其同名端，下面介绍一种常用的测试方法。

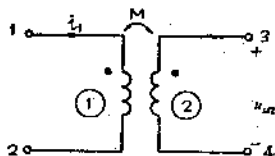
图7-3-4(a)画出了这种实验法的电路图，把互感线圈的一个线圈通过开关SA接到一个直流电源（如干电池）上，把一个直流电压表（或电流表）接到另一线圈上。当开关SA迅速闭合时，就有随时间增长的电流 i_1 从电源正极流入线圈端钮1，如果电压表的指针正向偏转，而且电压表的正极联接线圈端钮3，则端钮1和端钮3是同名端。

这是为什么呢？假设互感线圈①、②的同名端，电流 i_1 以及互感电压 u_{M2} 的参考方向如图7-3-4(b)所示，则 $u_{M2} = M \frac{di_1}{dt}$ 。

当开关SA闭合瞬间 $\frac{di_1}{dt} > 0$ ，所以 $u_{M2} > 0$ ，即互感电压



(a)



(b)

图 7-3-4 同名端的实验测定法

u_{M2} 的实际极性与参考极性一致，端钮 3 为高电位端，因此电压表的指针应正向偏转。这说明上述的判断是正确的。

【例 7-3-1】在图 7-3-5 所示电路中，两线圈之间的互感 $M = 0.02\text{H}$ ， $i_1 = 10\sin 1000t\text{A}$ ，试求互感电压 u_2 。

解：图中所示 i_1 及 u_2 的参考方向对同名端是不一致的，因此

$$\begin{aligned} u_2 &= -M \frac{di_1}{dt} \\ &= -0.02 \times \frac{d}{dt} (10\sin 1000t) \\ &= -200 \cos 1000t \\ &= 200 \sin(1000t - 90^\circ) \text{V} \end{aligned}$$

如利用相量关系式求解，则

$$\dot{U}_2 = -j\omega M \dot{I}_1$$

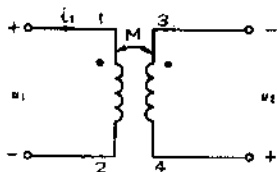


图 7-3-5 例 7-3-1 电路