



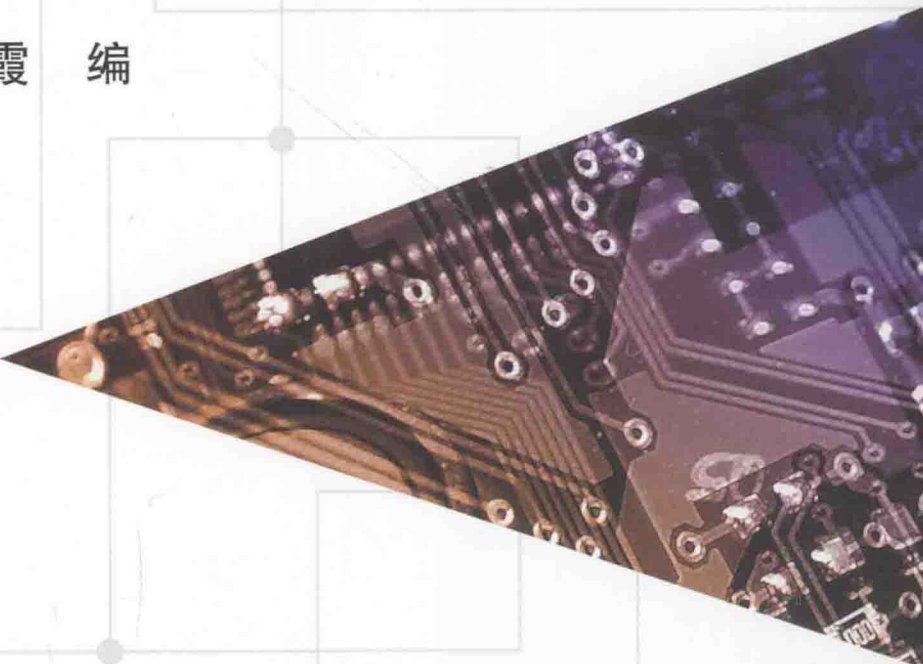
高等院校网络教育精品教材

——电气电子类

DIANLU FENXI (II)

电路分析 (II)

谭永霞 编



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高等院校网络教育精品教材——电气电子类

电路分析(II)

谭永霞 编

西南交通大学出版社

(II) 续修版

编 著 者

编 著 者

西南交通大学出版社

(II) 续修版

编 著 者

编 著 者

(II) 续修版

编 著 者

mm Dec. 1 am 231

231.11

231.11

231.11

231.11

231.11

231.11

编 著 者

编 著 者

编 著 者

编 著 者

编 著 者

编 著 者

编 著 者

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书是根据教育部颁布的《高等学校电路课程教学基本要求》，并结合网络教育的特点编写的。《电路分析（Ⅱ）》是电路分析教程的下篇，全书共分六章，主要包括：含有互感元件的电路、三相交流电路、周期性非正弦电路、双口网络、一阶电路的时域分析、二阶电路的时域分析等。本书各章配有比较详细的学习指导，并编写了较为丰富的典型例题和习题，每章后面都有反映本章重点和难点的内容小结，书末附有答案。

本书主要作为高等院校网络教育电类（强、弱电）专业的教材，也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电路分析. 2 / 谭永霞编. —成都：西南交通大学出版社，2011.9

高等院校网络教育精品教材. 电气电子类
ISBN 978-7-5643-1406-4

I. ①电… II. ①谭… III. ①电路分析—高等学校—教材 IV. ①TM133

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 185709 号

高等院校网络教育精品教材——电气电子类

电路分析（Ⅱ）

谭永霞 编

责任编辑	李芳芳
特邀编辑	宋彦博
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 编	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	成都勤德印务有限公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	13.125
字 数	328 千字
版 次	2011 年 9 月第 1 版
印 次	2011 年 9 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1406-4
定 价	25.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

前 言

电路分析是高等工科院校电类专业的一门非常重要的专业基础课,对发展学生科学思维,培养学生分析问题、解决问题的能力具有十分重要的作用。《电路分析(Ⅱ)》是电路分析教程的下篇,要求在学完《电路分析(Ⅰ)》的内容之后再学习本教材的内容。现代化教学手段的普遍应用以及远程网络教育的开展,对教材的建设提出了新的要求。为此,本书作者在充分考虑了远程网络教学的特殊性以及网络学院学生知识层次的差异性的基础上,编写了《电路分析(Ⅱ)》这本教材。

在教材的编写过程中,力求做到深入浅出、通俗易懂,利于学生阅读和自学。在内容的编排上,遵循人们普遍的认识规律,引导读者循序渐进、由浅入深、由易到难,在确保对基础知识牢固掌握的基础上,加强与工程实际应用的联系。

本教材在每一章的开头都给出了明确的学习指导,包括学习目标、学习重点与难点、学习方法建议、学习时间建议等;在每一章节的教学内容中精心编写了形式多样的例题,以加强学生对知识点的掌握;在每一章的结尾对本章的知识点、重点、难点做了较为详尽的小结;各章都配有丰富的、用来检测知识掌握程度、学习效果的作业与练习题,书后附有答案(详细的解题过程,在西南交通大学网络学院的网络教育课程电路分析题库中)。

本教材共六章,主要内容有含有互感的电路、三相交流电路、周期性非正弦电路、双口网络、一阶电路的时域分析、二阶电路的时域分析等。在电路分析课程的讲授过程中,由于强电专业和弱电专业对该课程的要求不同,学时安排也有区别,所以可根据具体的教学要求对以上教学内容作适当的调整或删减。

在教材的编写过程中,参考了众多国内、外的优秀教材,受益匪浅。另外,很多“理论电工”的前辈和同行也给予了很多关怀和支持,在此编者一并表示衷心的感谢。

本书由谭永霞编写,书中的疏漏和不足之处,希望广大读者批评指正。读者意见请发往邮箱: yxtan@nec.swjtu.edu.cn.

编 者

2011年6月

目 录

第 7 章 含有互感元件的电路	1
7.1 互感与互感电压	3
7.2 含有互感元件电路的分析计算	11
7.3 空心变压器	21
7.4 全耦合变压器与理想变压器	24
内容小结 7	31
作业与练习 7	36
第 8 章 三相交流电路	42
8.1 三相交流电路	43
8.2 对称三相交流电路的分析计算	48
8.3 不对称三相交流电路的分析计算	57
8.4 三相交流电路的功率及其测量	61
内容小结 8	69
作业与练习 8	73
第 9 章 周期性非正弦电路	78
9.1 周期信号及其傅里叶级数	79
9.2 有效值、绝对平均值和功率	88
9.3 周期性非正弦电路的分析计算	93
内容小结 9	100
作业与练习 9	103
第 10 章 双口网络	108
10.1 双口网络简介	109
10.2 双口网络的四组方程及参数	110
10.3 双口网络的等效电路	124
10.4 双口网络的连接	126
内容小结 10	129
作业与练习 10	133

第 11 章 一阶电路的时域分析	137
11.1 引 言	139
11.2 初始条件的确定	140
11.3 一阶电路的零输入响应	144
11.4 一阶电路的零状态响应	152
11.5 一阶电路的全响应	157
11.6 一阶电路时域分析的三要素法	161
11.7 一阶电路的阶跃响应	166
内容小结 11	170
作业与练习 11	172
第 12 章 二阶电路的时域分析	179
12.1 二阶电路的零输入响应	180
12.2 二阶电路的零状态响应和全响应	187
内容小结 12	192
作业与练习 12	193
作业与练习答案	196
参考文献	204

第7章 含有互感元件的电路

【学习指导】

1. 学习目标

- (1) 熟练掌握同名端的标注方法；
- (2) 熟练掌握自感、互感的概念；
- (3) 熟练掌握互感元件线圈端口的电压、电流关系；
- (4) 熟练掌握对互感元件的两种处理方法，即用受控源表示互感电压和互感消去法（去耦法）；
- (5) 熟练掌握含有互感元件电路的分析求解方法；
- (6) 掌握空心变压器、全耦合变压器、理想变压器的概念及分析方法。

2. 学习建议

(1) 学习时间：9~12 小时

7.1 节建议学习时间：3 小时；

7.2 节建议学习时间：3 小时；

7.3 节建议学习时间：1 小时；

7.4 节建议学习时间：2 小时。

(2) 学习方法

① 学习本章前复习复数的知识，要求能熟练地用计算器进行复数的代数表达与极坐标表达的相互转换，复习物理学中法拉第电磁感应定律、楞次定律的相关内容，复习第 6 章正弦交流电路的稳态分析方法；

② 认真学习教材第 7 章的教学内容；

③ 参加第 7 章在线导学直播；

④ 点播学习网络课程第 7 章相对应的教学内容；

⑤ 认真完成第 7 章的作业题。

3. 学习重点与难点

- ① 同名端的标注方法；
- ② 自感电压、互感电压的表示方法；

- ③ 互感元件线圈端口的电压、电流关系;
- ④ 用受控源表示互感电压的等效电路的画法;
- ⑤ 互感消去法(去耦法)的等效电路的画法;
- ⑥ 理想变压器的概念及端口变量的约束关系。

4. 本章内容提要

本章介绍的是含有互感元件电路的分析求解方法,内容包括:互感与互感电压、含有互感元件电路的分析计算、空心变压器、全耦合变压器与理想变压器等。

【导学启学】

科目区学 1

; 互感元件的端口电压、电流关系 (1)

; 互感电压的等效电路 (2)

; 互感消去法 (去耦法) 的等效电路 (3)

; 理想变压器的概念及端口变量的约束关系 (4)

【知识

; 互感元件的端口电压、电流关系 (1)

; 互感电压的等效电路 (2)

【例题区学 2

例 1-1-1: 互感元件 (1)

; 例 1-1-2: 互感电压 (2)

; 例 1-1-3: 互感消去法 (3)

; 例 1-1-4: 互感电压 (4)

; 例 1-1-5: 互感电压 (5)

【例题区学 3

; 互感元件的端口电压、电流关系 (1)

; 互感电压的等效电路 (2)

; 互感消去法 (去耦法) 的等效电路 (3)

; 理想变压器的概念及端口变量的约束关系 (4)

; 互感电压的等效电路 (5)

; 互感消去法 (去耦法) 的等效电路 (6)

; 理想变压器的概念及端口变量的约束关系 (7)

【例题区学 4

; 互感元件的端口电压、电流关系 (1)

; 互感电压的等效电路 (2)

7.1 互感与互感电压

7.1.1 自感与互感

当电流通过一个线圈时, 根据右手螺旋定则可以确定该电流所产生的磁链方向。如果一个线圈的电流所产生的磁链不仅穿过本线圈, 还穿过其他线圈, 那么称该线圈与其他线圈之间具有磁耦合或者说存在互感。

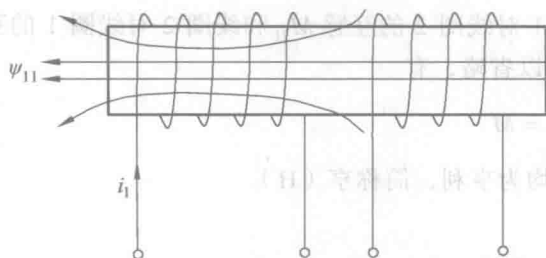


图 7.1 两个线圈的互感 (线圈 1 通电流)

图 7.1 所示是两个具有磁耦合 (互感) 的线圈。当线圈 1 中通有电流 i_1 时, 在线圈 1 中产生的磁链为 ψ_{11} (下标中的第一个数字 1 表示磁链穿过第 1 个线圈, 第二个数字 1 表示该磁链是由流过第 1 个线圈的电流产生的)。由于 ψ_{11} 是流过线圈 1 的电流在线圈 1 中产生的磁链, 故将 ψ_{11} 称为线圈 1 的自感磁链。当互感元件不考虑磁饱和 (即互感元件为线性元件) 时, 定义线圈 1 的自感系数 (简称自感) 为

$$L_1 = \frac{\psi_{11}}{i_1} \quad (7.1)$$

如果线圈 1 的电流 i_1 在线圈 2 中产生的磁链为 ψ_{21} (下标中的第一个数字 2 表示磁链穿过第 2 个线圈, 第二个数字 1 表示该磁链是由流过第 1 个线圈的电流产生的), 则称 ψ_{21} 为线圈 1 对线圈 2 的互感磁链, 且定义线圈 1 对线圈 2 的互感系数 (简称互感) 为

$$M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_1} \quad (7.2)$$

同样, 当线圈 2 中通有电流 i_2 时 (见图 7.2), 在线圈 2 中产生的磁链 ψ_{22} 称为线圈 2 的自感磁链, 且定义线圈 2 的自感系数 (简称为线圈 2 的自感) 为

$$L_2 = \frac{\psi_{22}}{i_2} \quad (7.3)$$

当线圈 2 的电流 i_2 所产生的磁链耦合到线圈 1 时, 定义磁链 ψ_{12} 为线圈 2 对线圈 1 的互感磁链, 并且定义线圈 2 对线圈 1 的互感系数为

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_2}$$

(7.4)

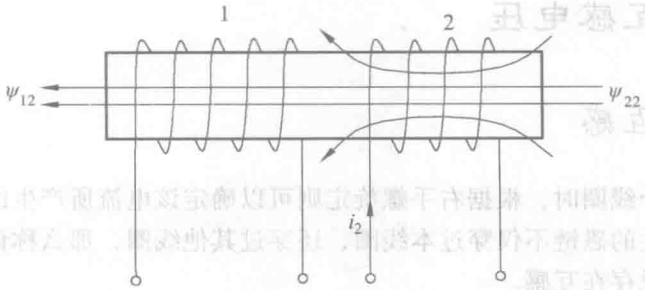


图 7.2 两个线圈的互感 (线圈 2 通电流)

实际上, 可以证明线圈 1 对线圈 2 的互感 M_{21} 和线圈 2 对线圈 1 的互感 M_{12} 是完全相等的, 故今后互感 M 的下标可以省略, 有

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

(7.5)

互感与自感的标准单位均为亨利, 简称亨 (H)。

7.1.2 自感电压与互感电压

当只有线圈 1 中通有电流 i_1 (见图 7.3) 时, 线圈 1 中只有自感磁链 ψ_{11} 穿过。当自感磁链 ψ_{11} 变化时, 根据电磁感应定律, 在线圈 1 两端会产生电压。该电压是由本线圈的电流产生的, 故称其为线圈 1 的自感电压。如果取线圈 1 的自感电压 u_{L1} 与电流 i_1 为关联参考方向, 如图 7.3 所示, 则

$$u_{L1} = \frac{d\psi_{11}}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt}$$

(7.6)

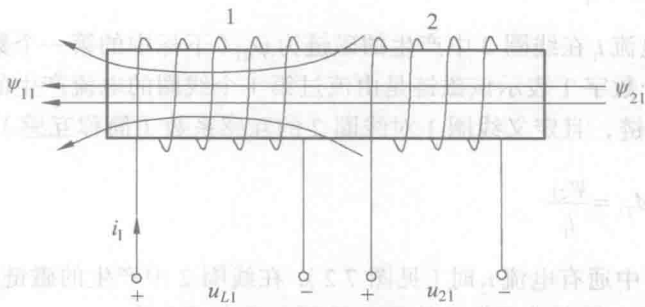


图 7.3 自感电压与互感电压 (线圈 1 通电流)

在图 7.3 所示电路中, 线圈 2 中虽然没有通电流, 但是线圈 2 中有互感磁链 ψ_{21} 穿过, 所以当互感磁链 ψ_{21} 发生变化时, 根据电磁感应定律, 在线圈 2 两端同样会产生电压, 称该电压为线圈 1 对线圈 2 的互感电压, 记作 u_{21} 。当互感电压 u_{21} 的压降方向与互感磁链 ψ_{21} 方向符合右手螺旋定则时 (图 7.3 所示参考方向即符合), 互感电压 u_{21} 为

$$u_{21} = \frac{d\psi_{21}}{dt} = M \frac{di_1}{dt} \quad (7.7)$$

若互感电压 u_{21} 的压降方向与互感磁链 ψ_{21} 方向不符合右手螺旋定则, 则互感电压 u_{21} 为

$$u_{21} = -M \frac{di_1}{dt} \quad (7.8)$$

同理, 当只有线圈 2 中通有电流 i_2 (见图 7.4) 时, 由于线圈 2 的自感电压 u_{L2} 与电流 i_2 取关联参考方向, 所以

$$u_{L2} = \frac{d\psi_{22}}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (7.9)$$

在图 7.4 所示的电路中, 线圈 2 的电流 i_2 对线圈 1 的互感电压记作 u_{12} , 而互感电压 u_{12} 的压降方向与互感磁链 ψ_{12} 方向满足右手螺旋定则, 故互感电压 u_{12} 为

$$u_{12} = M \frac{di_2}{dt} \quad (7.10)$$

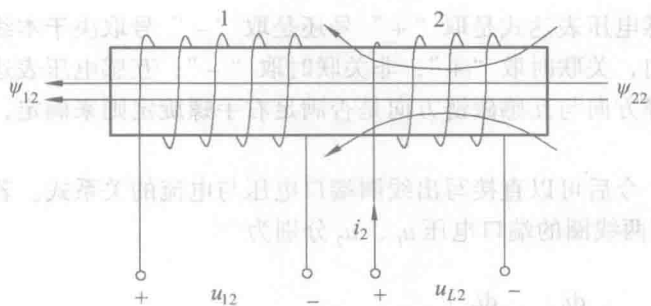


图 7.4 自感电压与互感电压 (线圈 2 通电流)

如果两个线圈中同时通有电流 (见图 7.5), 在不考虑磁饱和, 即线圈中磁通可以线性叠加的情况下, 穿过每个线圈的磁链就是自感磁链和互感磁链的线性叠加, 那么每个线圈两端的电压均由自感电压和互感电压两部分组成。

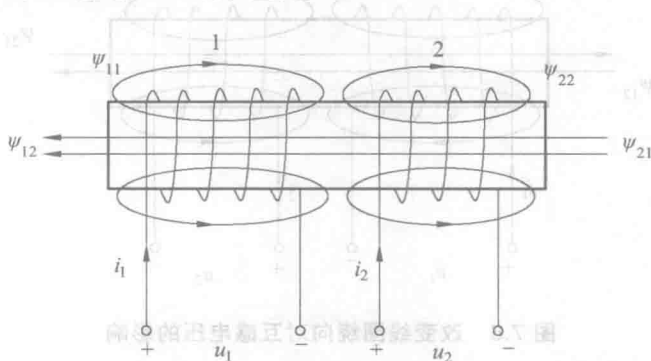


图 7.5 自感电压与互感电压 (两线圈均通电流)

在图 7.5 所示的两个线圈中均通有电流的电路中, 根据右手螺旋定则可知, 电流 i_1 、 i_2 产生的磁链及方向如图所示。不难看出, 穿过线圈 1 的自感磁链 ψ_{11} 与互感磁链 ψ_{12} 方向相同, 故穿过线圈 1 的总磁链为

$$\psi_1 = \psi_{11} + \psi_{12}$$

穿过线圈 2 的自感磁链 ψ_{22} 与互感磁链 ψ_{21} 方向相同, 故穿过线圈 2 的总磁链为

$$\psi_2 = \psi_{22} + \psi_{21}$$

当穿过线圈 1 的磁链发生变化时, 根据电磁感应定律与楞次定律, 线圈 1 的端口电压 u_1 为

$$u_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = \frac{d(\psi_{11} + \psi_{12})}{dt} = \frac{d(L_1 i_1 + M i_2)}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

同样, 线圈 2 的端口电压 u_2 为

$$u_2 = \frac{d\psi_2}{dt} = \frac{d(\psi_{22} + \psi_{21})}{dt} = \frac{d(L_2 i_2 + M i_1)}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

由前可知, 自感电压表达式是取“+”号还是取“-”号取决于本线圈端口电压与电流是否为关联参考方向, 关联时取“+”, 非关联时取“-”; 互感电压表达式的正负号则根据线圈端口电压的压降方向与互感磁链方向是否满足右手螺旋定则来确定, 满足右手螺旋定则时取正, 否则取负。

根据这一规则, 今后可以直接写出线圈端口电压与电流的关系式。若电压、电流参考方向如图 7.5 所示, 则两线圈的端口电压 u_1 、 u_2 分别为

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 &= L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (7.11)$$

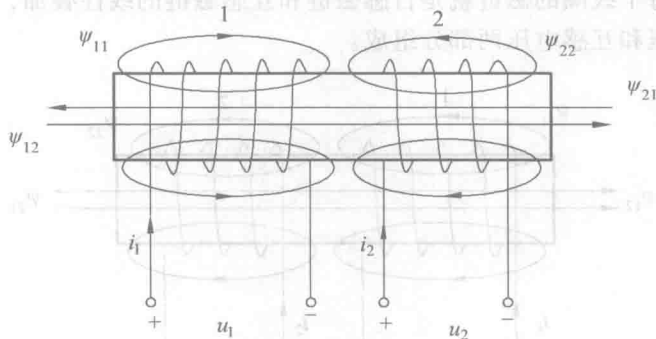


图 7.6 改变线圈绕向对互感电压的影响

在图 7.6 所示电路中, 两个线圈的端口电压与电流的参考方向虽然与图 7.5 所示电路的

相同,但由于改变了线圈2的绕向,所以穿过线圈1的总磁链(其方向与电压降 u_1 方向符合右手螺旋定则)为



$$\psi_1 = \psi_{11} - \psi_{12} = L_1 i_1 - M i_2$$

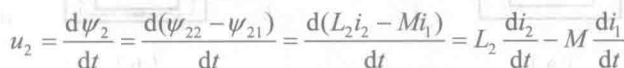
穿过线圈2的总磁链(其方向与电压降 u_2 方向符合右手螺旋定则)为

$$\psi_2 = \psi_{22} - \psi_{21} = L_2 i_2 - M i_1$$

所以线圈1的端口电压 u_1 为

$$u_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = \frac{d(\psi_{11} - \psi_{12})}{dt} = \frac{d(L_1 i_1 - M i_2)}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}$$

线圈2的端口电压 u_2 为



$$u_2 = \frac{d\psi_2}{dt} = \frac{d(\psi_{22} - \psi_{21})}{dt} = \frac{d(L_2 i_2 - M i_1)}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}$$

由此可知,如果线圈端口电压的压降方向与互感磁链方向不满足右手螺旋定则,则互感电压部分应取负;对于自感电压部分,由于端口电压与电流为关联参考方向,故取正号。所以图7.6所示两线圈的端口电压 u_1 、 u_2 分别为

$$\begin{cases} u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \end{cases} \quad (7.12)$$

由以上分析可知,互感电压不仅取决于电流的参考方向,还与线圈的绕向有关。

7.1.3 同名端

在电路中,为方便作图,常用相同的符号如“•”或“*”等,来表示两线圈的绕向及其相对位置的关系。标记方法分下面两种情况:

7.1.3.1 两线圈的结构(绕向)已知

如果知道两线圈的绕向和相对位置,可以通过以下方法确定两线圈的同名端:当两线圈的电流均由同名端流入时,两电流所产生的磁链应相互增强(即两电流所产生的磁链方向一致)。图7.7(a)所示的两个线圈,当电流分别从 a 端和 c 端流入时,这两个电流产生的磁链方向一致,所以 a 端与 c 端为同名端,在 a 端和 c 端标注相同的标记。当然, b 端与 d 端也为同名端,但只需标注一对端子。另外,称 a 端与 d 端、 b 端与 c 端为异名端。图7.7(b)所示的两个线圈,当线圈1的电流从 a 端流入时,要使线圈2中电流所产生磁链方向与线圈1中电流产生的磁链方向相同,则线圈2的电流必须从 d 端流入,故 a 端与 d 端为同名端,标注相同的符号。

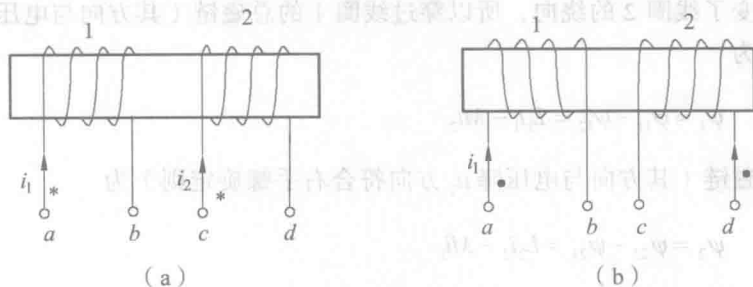


图 7.7 互感线圈的同名端

例 7.1 判断图 7.8 (a) 所示线圈的同名端。

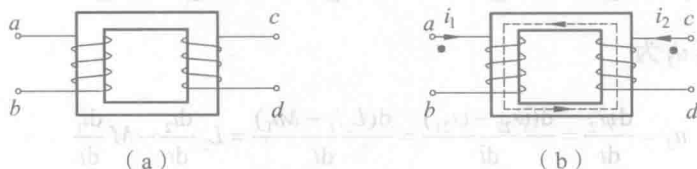


图 7.8 例 7.1 图

解: 假设电流 i_1 由 a 端流入, 根据右手螺旋定则, 由电流 i_1 产生的磁链方向如图 7.8 (b) 所示 (逆时针); 如让电流 i_2 也产生相同方向的磁链, 则电流 i_2 必须从 c 端流入, 故线圈的 a 端与 c 端为同名端。在这两个端子上标注相同符号, 如图 7.8 (b) 所示。

需要说明的是, 同名端的判断虽然可以借助电流所产生磁通方向是否一致进行确定, 但两个线圈的同名端关系只取决于两个耦合线圈的结构 (绕向和相对位置), 与电压、电流的设置没关系。

由于线圈的同名端可以反映两个线圈的绕向关系, 故具有互感的两个线圈今后在电路中就不需要再画线圈的绕向, 而是仅标出同名端, 将自感 L_1 、 L_2 标在线圈边, 用双向箭头以及互感 M 将具有磁耦合的两个线圈联系起来, 如图 7.9 所示。

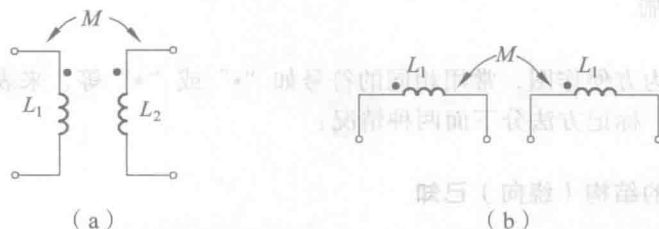


图 7.9 用同名端标记互感线圈

7.1.3.2 线圈结构未知

在不知道两个线圈结构的情况下, 可以通过实验的方法判别同名端。实验电路如图 7.10 所示。电压表采用直流电压表, 电压表的 “+” 端接线圈的 c 端, 电压表的 “-” 端接线圈的 d 端。

开关 K 原来是打开的, 当开关 K 闭合时, 如果电压表正偏, 则 a 端与 c 端为同名端; 如

果电压表反偏,则 a 端与 d 端为同名端。其原因是:开关 K 由打开状态变为闭合状态时, $\frac{di_1}{dt} > 0$,

若 a 端与 c 端为同名端,则 $u_{cd} = M \frac{di_1}{dt}$; 若 a 端与 d 端为同名端,则 $u_{cd} = -M \frac{di_1}{dt}$ 。

开关 K 由闭合状态变为打开状态时,由于 $\frac{di_1}{dt} < 0$, 所以 a 端与 c 端为同名端时,电压表应该反偏;如果此时电压表正偏,则说明 a 端与 d 端为同名端。所以,通过电压表的偏转方向就可以判别两个线圈的同名端。

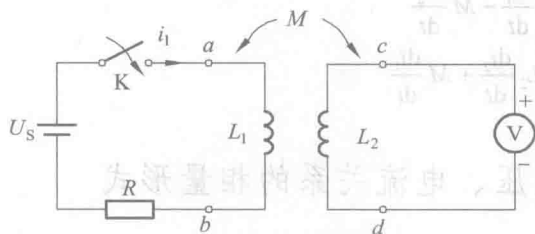


图 7.10 实验法判别同名端

例 7.2 电路如图 7.11 所示,写出端口电压与电流的关系式。

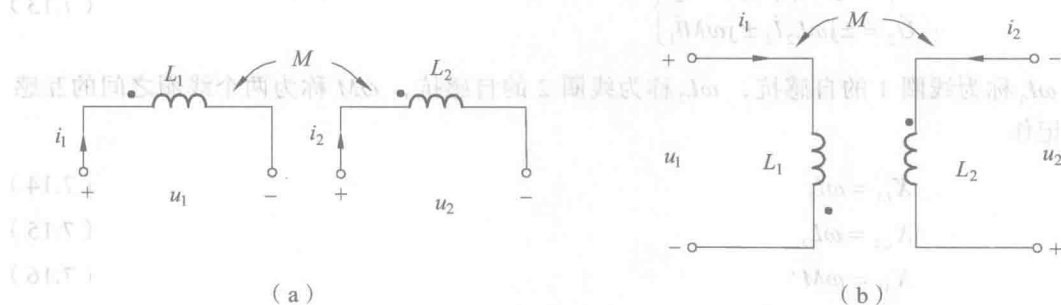


图 7.11 例 7.2 图

解: 图 7.11 (a) 所示电路,两线圈端口的电压与电流均为关联参考方向,故自感电压表达式均为正。电流 i_2 从标有“•”的端子流入,故互感电压 $M \frac{di_2}{dt}$ 的“+”极性端位于第一个线圈的同名端,即标有“•”的端子上。同理,由于电流 i_1 从标有“•”的端子流入,故感应到第二个线圈的互感电压 $M \frac{di_1}{dt}$ 的“+”极性端位于电流 i_1 流入端子的同名端,即第二个线圈标有“•”的端子上,所以有

$$u_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

对于图 7.11 (b) 所示电路,第一个线圈的电压与电流为关联参考方向,故其自感电压表

达式取“+”。互感电压 $M \frac{di_2}{dt}$ 的“+”极性端为电流 i_2 流入端的同名端, 即第一个线圈标有“•”的端子。再根据第一个线圈标出的电压参考方向, 可知互感电压表达式取“-”号。第二个线圈的电压与电流为非关联参考方向, 故其自感电压表达式取“-”号。互感电压 $M \frac{di_1}{dt}$ 的“+”极性端为电流 i_1 流入端的同名端, 即第二个线圈没有标“•”的端子, 故互感电压表达式取“+”号。于是

$$\begin{aligned} u_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 &= -L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{aligned}$$

7.1.4 互感元件电压、电流关系的相量形式

若将互感元件放在正弦交流稳态电路中, 通常采用相量法分析电路。互感元件的电压、电流关系可以用相量形式表示, 即

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \pm j\omega L_1 \dot{I}_1 \pm j\omega M \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 = \pm j\omega L_2 \dot{I}_2 \pm j\omega M \dot{I}_1 \end{cases} \quad (7.13)$$

其中, ωL_1 称为线圈 1 的自感抗, ωL_2 称为线圈 2 的自感抗, ωM 称为两个线圈之间的互感抗, 并记作

$$X_{L1} = \omega L_1 \quad (7.14)$$

$$X_{L2} = \omega L_2 \quad (7.15)$$

$$X_M = \omega M \quad (7.16)$$

其标准单位为欧姆 (Ω)。

自感电压、互感电压取“+”号还是取“-”号, 原则与前面的分析相同, 即根据电压、电流的参考方向以及两线圈的同名端关系确定。

例 7.3 写出图 7.12 所示电路的电压与电流的关系式。

解: 电压 $\dot{U}_1$ 与电流 $\dot{I}_1$ 为非关联参考方向, 所以线圈 1 的自感电压 $j\omega L_1 \dot{I}_1$ 取“-”号。电流 $\dot{I}_2$ 从标有“•”的端子流入, 所以互感电压 $j\omega M \dot{I}_2$ 的“+”极性端为第一个线圈标有“•”的端子。根据电压 $\dot{U}_1$ 的参考方向, 可得互感电压 $j\omega M \dot{I}_2$ 取“+”号。对于第二个线圈, 电压 $\dot{U}_2$ 与电流 $\dot{I}_2$ 为关联参考方向, 所以自感电压 $j\omega L_2 \dot{I}_2$ 取“+”号。电流 $\dot{I}_1$ 从没标“•”的端子流入, 所以感应到第二个线圈上的互感电压 $j\omega M \dot{I}_1$ 的“+”极性端为第二个线圈没标“•”的端子处。根据电压 $\dot{U}_2$ 的参考方向, 可得互感电压 $j\omega M \dot{I}_1$ 取“-”号。

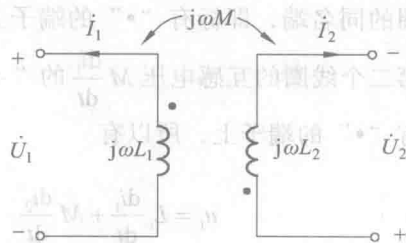


图 7.12 例 7.3 图

综上, 图 7.12 所示电路的电压与电流的关系式为

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= -j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1\end{aligned}$$

7.2 含有互感元件电路的分析计算

当电路中含有互感元件时, 互感线圈两端的电压不仅与本线圈的电流有关(自感电压), 还与另外的线圈电流有关(互感电压)。因为互感电压部分通常可以等效为电流控制的电压源(CCVS), 所以对于含有互感元件电路的分析方法之一便是用受控源表示互感电压。如果具有耦合关系的两个线圈有电联结, 如串联、并联或有一端相连等, 那么对于这类电路还有一种有效的分析方法, 即去耦法, 又称互感消去法。由于以下分析均在正弦交流稳态情况下展开, 故仍采用相量法分析。

7.2.1 用受控源表示互感电压

在图 7.13 (a) 所示电路中, 根据图示的同名端关系以及线圈上电压、电流的参考方向, 不难写出两线圈端口的电压、电流关系为

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= j\omega L_1 \dot{I}_1 + j\omega M \dot{I}_2 \\ \dot{U}_2 &= j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega M \dot{I}_1\end{aligned}$$

在 $\dot{U}_1$ 的表达式中, 自感电压 $j\omega L_1 \dot{I}_1$ 与本支路的电流成比例, 和普通电感元件的电压没区别, 故自感电压部分可等效为一个电感 $j\omega L_1$; 互感电压 $j\omega M \dot{I}_2$ 的值受控于另一线圈上的电流 $\dot{I}_2$, 故互感电压 $j\omega M \dot{I}_2$ 可等效成一个受控的电压源。用受控源表示互感电压后的等效电路如图 7.13 (b) 所示。

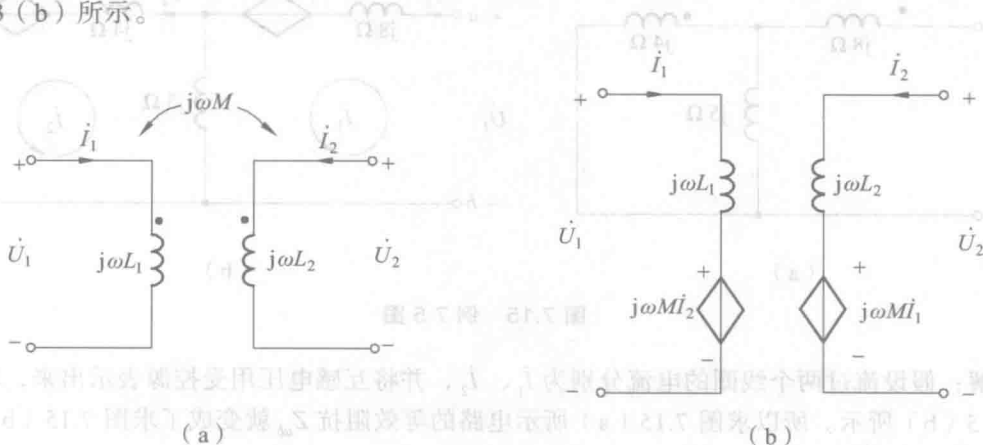


图 7.13 用受控电压源表示互感电压

例 7.4 互感元件如图 7.14 (a) 所示, 画出用受控源表示互感电压的等效电路。