

[编者按]电源工程师最头痛的问题之一是磁元件问题。磁元件不同于其它电子元件,大多数磁元件是量身定制的,这要求电源工程师必须具有电磁基本知识,尤其是高频下磁元件特性,以及工艺结构对磁元件特性的影响等。而在学校磁的知识学习得很少,尤其高频下磁元件学习更少。本刊特邀赵修科教授就此专题展开系列讲座,系统地介绍了磁的基本原理和高频磁元件设计的有关问题,本讲座共分为六讲。

第 2 讲 自感、互感和变压器

赵修科

(南京航空航天大学, 江苏 南京 210016)

中图分类号:TN911 文献标识码:B 文章编号:0219-2713(2007)08-0052-05

应用安培环路定律和电磁感应定律,将磁性元器件的电磁关系简化为电路关系—自感、互感和变压器,使得分析和计算简化。

2.1 自感

通常磁通或磁链是流过线圈的电流 i 产生的。如果线圈中磁介质的磁导率 μ 是常数时, Ψ (Φ) 与 i 成正比关系,即

$$\Psi = Li$$

如果磁通 (Φ) 匝链全部激励线圈匝数 N , 则

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} \quad (2-1)$$

式中: L 为称为线圈 N 的自感系数,通常简称为自感或电感。

由式(2-1)得到电感 L 的定义为单位电流产生的总磁通链。

如果电感线圈中电流发生变化,在线圈两端产生感应电势,考虑式(2-1)得到

$$e_L = - \frac{d\Psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} \quad (2-2)$$

式(2-2)右边的负号表示电感两端的感应电势 e_L 总是阻止电流的变化。当电流增大时,感应电势与电流方向相反;电流减小时,自感的感应电势与电流方向相同(图 2-1 所示)。总是试图维持

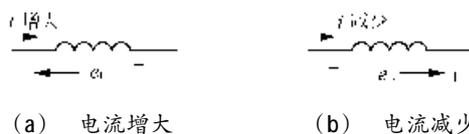


图 2-1 自感电动势与电流变化的关系

电感电流不变,即试图维持线圈包围的磁通不变。

电感阻止电流变化的性质表明电感的储能特性。当电压加到电感量为 L 的线圈上时,在线圈两端产生感应电势[式(2-2)],在线圈中产生电流。在时间 t 内,电流达到 i ,电源传输到电感的能量:

$$W_e = \int_0^t u i dt = \int_0^t i L \frac{di}{dt} dt = \int_0^t L i di = \frac{1}{2} L i^2 \text{ (J)} \quad (2-3)$$

由式(1-10~1-12)和(2-3)可见,电源输出的能量变为磁场能量。在电路中存储能量的大小与电感的一次方成正比,与电流的二次方成正比。反映在电路中磁场能量是电感电流。电感电流存在,磁场存在;电流为零,磁场消失。建立磁场或使磁场消失,需要从电源向电感输入或从电感释放能量。要使一定电感电流减少或增加某一数值,因为有能量的输出和输入,都必须经过一定的时间完成,不可能在瞬间改变。特别是载流电感要使磁场为零时必须将电感转接到一个闭合损耗回路,提供能量释放。

还应当注意,本质上,电感阻止电流变化的特性就是阻止电感磁芯中磁通变化的特性。

收稿日期:2007-05-21

2.2 互感

2.2.1 线圈之间的互感

如果绕在一个磁芯上有两个匝数分别是 N_1 和 N_2 的线圈,即互相间有磁通链合,如图 2-2 所示。当 N_1 中流过的电流 i_1 发生变化时,此电流产生的磁通 Φ_{11} 也发生变化。根据电磁感应定律,在 N_1 上产生感应电势,这就是自感电势。由于 N_1 和 N_2 有磁的联系,即磁通 Φ_{11} 不仅链合 N_1 ,而且其中一部分 Φ_{12} 穿过 N_2 , i_1 变化时, Φ_{12} 也随之变化。因此在 N_2 中也产生感应电势;同理,如果在 N_2 中电流 i_2 发生变化时,同样也会在 N_1 中产生感应电势,这种现象称为互感现象。各线圈之间的磁通相互匝链的关系称为磁耦合。

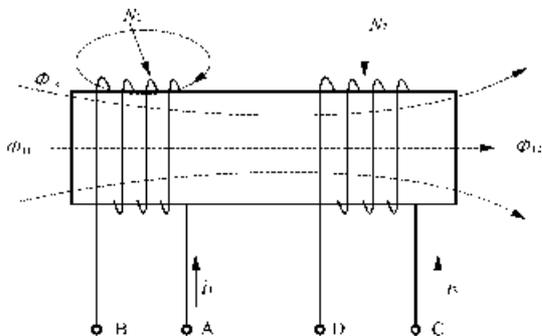


图 2-2 互感现象

2.2.2 互感系数

在图 2-2 中 Φ_{11} 产生的磁通 Φ_{12} 与线圈 N_2 交链,其磁链为 $\Psi_{12}=N_2\Phi_{12}$ 。因磁通大小与电流 i_1 的大小成正比,对于一定的匝数 N_2 ,磁链 Ψ_{12} 也与电流 i_1 成正比,可表示为

$$\Psi_{12}=M_{12}i_1 \quad (2-4)$$

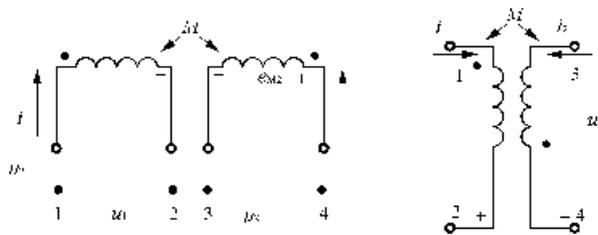
此比例系数 M_{12} 称为线圈 N_1 和 N_2 之间的互感系数,简称互感,即

$$M_{12}=\frac{\Psi_{12}}{i_1} \quad (2-5)$$

同理, N_2 和 N_1 之间的互感系数为 M_{21} 。一般 $M_{12}=M_{21}=M$ 。互感单位与自感相同,也是亨利。

2.2.3 同名端和互感电动势

如果从存在互感的两个线圈各自一端流入电流,在线圈中产生的磁通方向一致,则两个线圈流入端为同名端,用‘·’表示。例如图 2-2 中 A 和 C 是同名端,当然 B 和 D 也是同名端,但只用‘·’表示一端,而线圈用简化符号,并标 M,如图 2-3 所示。一个线圈‘·’端与另一个线圈无‘·’端成为异



(a) 电流 i_2 从 4 端流入 (b) 电流 i_2 从 3 端流入

图 2-3 同名端的表示

名端,例如图 2-3 (a) 的 1 端和另一个线圈的 3 端,同样的道理,2 和 4 端。

从两个自感分别为 L_1 和 L_2 ,互感为 M 的线圈同名端(图 2-3 中 1 和 3 端)分别流入电流 i_1 和 i_2 ,根据电磁感应定律,在线圈两端产生感应电势

$$u_1=-e_{L1}-e_{M2}=L_1\frac{di_1}{dt}+M\frac{di_2}{dt} \quad (2-6)$$

$$u_2=-e_{L2}-e_{M1}=L_2\frac{di_2}{dt}+M\frac{di_1}{dt} \quad (2-7)$$

式中:第一项式自感电势;

第二项式互感电势。

如果线圈 3-4 从 3 端流入,如图 2-3 (b) 所示,互感电势与自感磁通相反,互感电势为负,以上两式中第二项前为负号。

2.2.4 互感的串连

如果将两个独立电感串连,总电感量为两个电感量之和。如果将有互感的两个电感串联,假如异名端连接,从一端流入电流,串联后的总电势 u 为

$$\begin{aligned} u &= \left(L_1\frac{di}{dt} + M\frac{di}{dt} \right) + \left(L_2\frac{di}{dt} + M\frac{di}{dt} \right) \\ &= (L_1+2M+L_2)\frac{di}{dt} = L_p\frac{di}{dt} \end{aligned} \quad (2-8)$$

等效电感 $L_p=L_1+L_2+2M$,如果两个耦合电感的同名端连接,则(2-8)中 M 前符号改为负号,总的等效电感为 $L_n=L_1+L_2-2M$ 。

一般有互感的两个电感不并联,除非两个电感在同一磁路,而且匝数相同。

2.2.5 耦合系数

当两个有互感的线圈 N_1 和 N_2 ,其中 N_1 通过电流 i_1 时(图 2-2),线圈 N_1 产生的磁通 Φ_{11} 可分为两个部分:一部分是同时匝链两个线圈的互感磁通 Φ_{12} ,另一部分磁通只与激励线圈 N_1 匝链,不与 N_2 链合,称为漏磁通 Φ_{1s} 。因为漏磁通不与 N_2 耦合,这部分磁场能量不能经 N_2 传输。因此,只有

在耦合磁路中才有漏磁通，独立电感不存在漏感问题。

两个线圈间磁通不能完全耦合，存在漏磁通，耦合磁通与总磁通之比成为耦合系数，即

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (2-9)$$

只有在没有漏磁通的情况下 $k=1$ 。磁芯闭合磁路互感线圈可近似 $k=1$ ，称为全耦合，此时互感 M 最大，即

$$M_m = \sqrt{L_1 L_2} \quad (2-10)$$

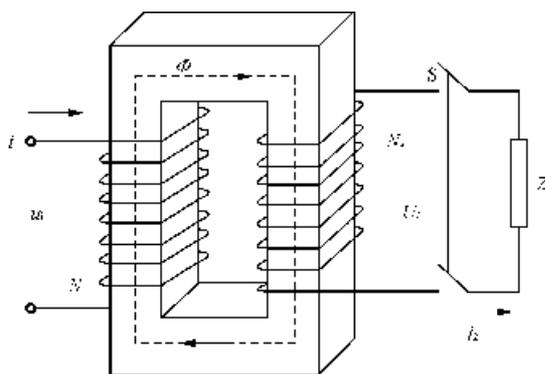
所以，在一般情况下，耦合系数可表示为

$$k = \frac{M}{M_m} \quad (2-11)$$

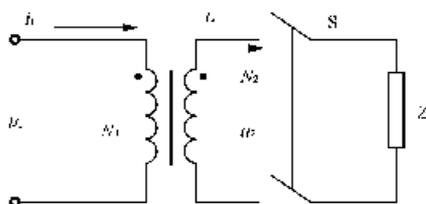
它是实际互感和最大互感的比值。

2.3 变压器

变压器是一个具有多线圈的耦合电感，即具有互感的一个或更多线圈构成的。图 2-4(a) 示出了两线圈变压器结构图，图 2-4(b) 为简化等效电路图。磁芯保证所有线圈产生的大部分磁通经过高磁导率磁路。图 2-4 中接输入电压的线圈 N_1 为初级（也可称为原边、一次边、原方等），输出线圈 N_2 为次级（也可称为副边、二次边、副方等）。



(a) 变压器结构图



(b) 简化电路图

图 2-4 变压器

2.3.1 变压器空载

在变压器的初级加一电压 u_1 ，而次级不接任何负载（图 2-4 中 S 打开），称为变压器空载。并假定初级与次级线圈全耦合 $k=1$ ，且所有线圈电阻为零。根据电磁感应定律， N_1 的端电压 u_1 为

$$u_1 = N_1 \frac{d\Phi_{11}}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (2-12)$$

式中： L_1 为次级开路时的初级电感。

在时间 t 时刻，磁芯中磁通和线圈中电流分别为

$$\Phi_{11} = \int_0^t \frac{u_1}{N_1} dt$$

$$i_{11} = \int_0^t \frac{u_1}{L} dt$$

线圈产生的感应电势等于输入电压，引起 N_1 中电流 i_{11} ，产生磁芯中磁通 Φ_{11} 。所以电流 i_{11} 称为激磁电流，对应的 Φ_{11} 称为主磁通。

因为是全耦合，在 N_2 中磁通变化率 $d\Phi_{12}/dt$ 与 N_1 中相同， $d\Phi_{12}/dt = d\Phi_{11}/dt$ 。 N_2 的端电压 u_2 为

$$u_2 = -e_{M2} = M \frac{di_1}{dt} = N_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} \quad (2-13)$$

根据式(2-12)和(2-13)，次级输出电压与输入电压的关系为

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} = n = \frac{L_1}{M} \quad (2-14)$$

式中： $n=N_1/N_2$ 称为变比。

因为是全耦合， $M = \sqrt{L_1 L_2}$ ，则变比 n 为

$$n = \frac{L_1}{\sqrt{L_1 L_2}} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$$

式中： L_2 为初级 N_1 开路时次级电感。

2.3.2 变压器负载状态

如果将次级与负载接通（图 2-4 中开关 S 合上），在次级线圈 N_2 中就产生电流 $i_2 = u_2/Z$ 流经负载。电流 i_2 在线圈 N_2 中产生磁势 $i_2 N_2$ 将产生磁通 Φ_2 ，与初级 $i_1 N_1$ 产生的磁通 Φ_1 的方向相反。为了维持与空载一样的感应电势 e_1 所需的磁通变化量 $\Phi_{11} = \Phi_1 - \Phi_2$ ，必须加大输入电流 i_1 保持激磁磁势 $i_{11} N_1$ 基本不变，即

$$i_{11} N_1 = i_1 N_1 - i_2 N_2 \quad (2-15)$$

或

$$i_1 = i_{11} + \frac{N_2}{N_1} i_2 = i_{11} + i_2' \quad (2-16)$$

式中 $i_2' = \frac{N_2}{N_1} i_2$ 为负载反射电流。负载电流越大,反射到初级电流也就越大。当激磁电感很大时,理想时为无穷大,则激磁电流为零。由式(2-16)可以得到

$$i_1 = i_2' = \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (2-17)$$

由此可见,初级和次级电流变化量之比与其匝数成反比,因此变压器也可称为电流变换器。

由图2-4可见,输入电流从初级(N_1 同名端)流入,从次级(N_2)同名端流出,变压器输出功率 P_0 为

$$P_0 = i_2 \times u_2$$

变压器如果是理想的,即线圈电阻为零,激磁电流为零,初次级紧耦合,次级感应电势等于输出端电压,则由式(2-14)和(2-17)得到

$$P_0 = i_2 \times u_2 = \frac{N_1 i_1}{N_2} \times \frac{u_1 N_2}{N_1} = u_1 i_1 \quad (2-18)$$

可见,输入功率等于输出功率。激磁磁场只是提供能量传输条件,不需要在磁场中存储能量,变压器作为能量传输之用。为了减小激磁电流,增大激磁电感,磁路应采用高磁导率材料。

2.3.3 变压器等效电路

2.3.3.1 理想变压器

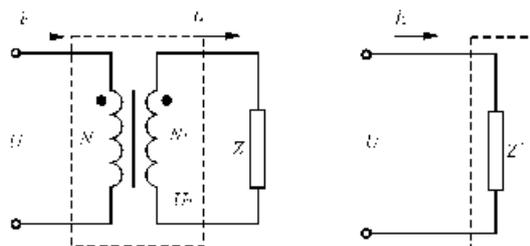
如果磁芯磁导率 $\mu = \infty$,激磁电流为零。同时初级与次级线圈全耦合,且线圈电阻为零,也不考虑磁芯损耗和饱和。这种变压器称为理想变压器。

当输出端有负载时,输入电流增加。考虑到式(2-17)和(2-14)。因此,变压器的等效输入阻抗 Z' 为

$$Z' = \frac{u_1}{i_1} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{u_2}{i_2} = n^2 Z \quad (2-19)$$

式中: Z' 称为反射阻抗。

负载阻抗折算到初级要乘以变比的平方。理想变压器负载等效电路如图2-5所示。



(a) 理想变压器 (b) 等效电路

图 2-5 理想变压器及其等效电路

2.3.3.2 实际变压器

实际变压器中,由于磁芯和线圈都不是理想的,存在许多寄生参数。在变压器建模时应当考虑这些寄生参数。

首先磁芯 μ 不是无限大,有一定电感量,即激磁电感。根据式(2-16),初级电流等于反射电流与激磁电流之和,所以激磁电感与理想变压器并联,如图2-6(a)所示。

其次,次级和初级线圈不是全耦合,如图2-2所示。次级包围的磁通 Φ_{12} 是总磁通 Φ_{11} 的一部分。根据电磁感应定律有

$$u_1 = N_1 \frac{d\Phi_{11}}{dt} = \frac{d\Psi_s}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = u_s + u_1 \quad (2-20)$$

式中: $u_1 = N_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt}$ 为有互感的磁通部分压降;次级电压 u_2 为

$$u_2 = N_2 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = \frac{N_2 u_1}{N_1}$$

而 $u_s = N_1 \frac{d\Phi_s}{dt}$ 为漏感电压降。或

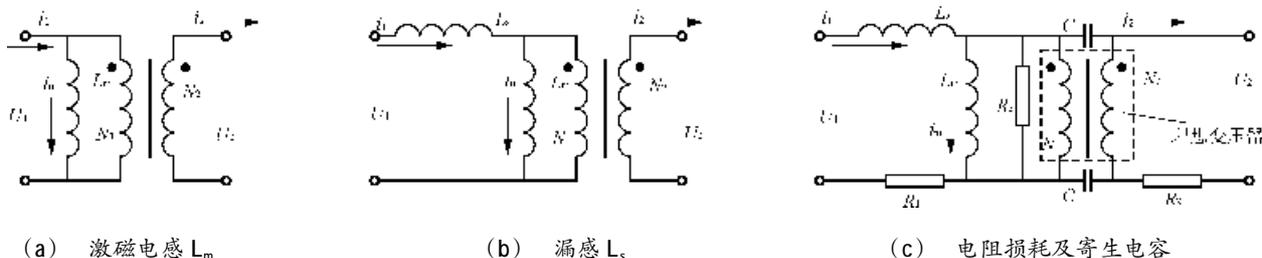
$$u_s = L_s \frac{di_1}{dt} = \frac{d\Psi_s}{dt} \quad (2-21)$$

因此,初级的漏感

$$L_{1s} = \frac{\Psi_s}{i_1} \quad (2-22)$$

式中: i_1 为初级电流。

从式(2-21)可见,漏感抗 L_s 与理想变压器是



(a) 激磁电感 L_m

(b) 漏感 L_s

(c) 电阻损耗及寄生电容

图 2-6 实际变压器等效电路图

串联的,如图 2-6(b)所示。因此,如果输出短路,同时次级线圈电阻为零,初级电压将全部加在漏感上。因此,耦合越好,短路电流越大,即变压器不能短路。

再其次,初级和次级线圈有导线电阻损耗,磁芯也有损耗,可用电阻 R_1 和 R_2 的损耗等效。线圈对地之间以及线圈之间存在寄生电容(C)等。

综合以上各种寄生参数,实际变压器等效电路如图 2-6(c)所示。

应当注意的是尽管变压器寄生参数复杂,但在不同的情况下可以简化。例如在低频时,磁芯的磁导率很高,初次级线圈耦合很好,线圈导线电流密度选取又比较低,这种情况下,可用理想变压器模型代替实际变压器。在高频时,如果线圈间采取

屏蔽,可忽略其寄生电容,同时通常损耗限制了磁芯磁感应的选取,磁化电流很小,可不考虑激磁电感的影响等。 [未完待续]

作者简介

赵修科(1937-),男,南京航空航天大学自动化学院教授。长期从事电力电子技术教学、研发和开发。主持和参加国家重点科研、开发和协作项目 20 余项,已鉴定或投产 10 项(航空主电源系统、应急电源、通信电源及电力操作电源等)。发表论文 50 余篇,主编、编写教材 8 种,如开关电源中的《磁性元器件》,编写的《电力电子技术》荣获航空优秀教材奖。现为中国电源学会理事、《电源技术学报》主编、江苏省电工技术学会副理事长、南京市电工技术学会理事长、台达科教发展基金委员会委员、《电源技术应用》编委。

德州仪器以最新 IP 电话平台进一步扩展 VoIP 产品系列

日前,德州仪器(TI)宣布推出最新 IP 电话平台 TNETV2502,以帮助制造商推出低成本 IP 电话,满足低端企业、中小型企业(SMB)以及家庭市场的需求。这款基于 TI DSP 的最新 IP 电话平台充分发挥 TI 在 IP 语音(VoIP)行业的丰富经验,不仅支持实时信号处理、低功耗等特性,而且为实现新一代 VoIP 设备提供了非常高的灵活性。TNETV2502 为帮助制造商开发低成本 IP 电话提供了完整的交钥匙型系统,材料清单(BOM)减少了 50% 之多。

In-Stat 研究机构近期进行的一项研究显示,VoIP 半导体行业的收入将从 2006 年的略高于 6 亿美元增长到 2010 年的 26.3 亿美元。IP 电话将占整体 VoIP 半导体销量的 60%,这显示出为支持这一不断发展的市场提供产品存在着巨大的潜力。

TNETV2502 采用 TI 的 TMS320C55x™ DSP 系列,并从 Adaptive Digital Technologies Incorporated (Adaptive Digital) 购买 IP 电话软件套件的软件许可证。Adaptive Digital 是 TI DSP 第三方网络的长期成员,在开发与支持基于 TI DSP(包括 TMS320C5000™ 与 TMS320C6000™ 平台)的 VoIP 软件方面拥有十多年的丰富经验。通过与 Adaptive Digital 在 TNETV2502 平台上开展合作,TI 能快速高效地为 OEM 与 ODM 厂商推出低成本 IP 电话解决方案,帮助他们加速产品上市进程,并降低 BOM 成本。同时,TI 的 DSP 实现了较高的性能与灵活性,配合 Adaptive Digital 的软件,能够帮助制造商实现无与伦比的可扩

展性,方便地满足 VoIP 市场不断发展的特性与标准要求。

利用基于 TNETV2502 的 IP 电话,中小型企业能方便地发挥 VoIP 的优势,避免了由于 VoIP 手机价格昂贵而需支付大量成本,花费大量时间。低端 IP 电话能够为各种企业与家庭用户提供所需的特性与性能,而且无需过高功耗或高级设备提供的先进功能。这种 IP 电话通常具备基本的电话功能,带有一个语音端口,即一个 G.711 或 G.729AB 通道,以及基本的 SIP 信令与通话控制功能。会议功能与其它辅助服务通常由要由网络提供,也可选支持更多的编解码器。

TI 的 TNETV2502 包含软硬件与完整的参考设计,为制造商提供了开发 IP 电话所需的全部工具。各种软件特性都在 TI 大受欢迎的 DSP/BIOS™ 操作系统上运行,从而降低了制造商利用该平台开发 IP 电话必需的版税量。TI 还提供补偿的编解码器,进一步简化了制造商向市场推出低端 IP 电话面临的挑战。作为低成本的 IP 电话解决方案,TI 的 TNETV2502 参考设计率先集成了最新以太网供电技术,使电话能直接通过标准以太网线缆供电,而无需 AC 电源。TNETV2502 计划于 2007 年第三季度全面推出。

作为 VoIP 解决方案的领先供应商,TI 已面向 IP 电话、客户端(CPE)网关以及高密度基础局端市场推出了逾 5 亿个 VoIP 端口。TI 与全球领先的 IP 电话厂商合作,拥有最广大的安装客户群,推出了业经验证的解决方案系列,以满足不断增长的 VoIP 市场需求。