

## 磁集成技术中磁性元件等效电路模型的研究

徐立平<sup>1</sup>, 王仲奕<sup>1</sup>, 顾沈卉<sup>1</sup>, 宋雨<sup>2</sup>

(1 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2 上海大学微电子中心, 200072, 上海)

**摘要:** 对磁件等效电路模型进行了概述,提出了一种新的磁件等效电路模型.新模型既能反映磁件的结构,又能方便电路分析计算,并且通过它建立起 4 类磁件等效电路模型的关系图,证明了 4 类磁件等效电路模型具有同一性.针对磁件的非线性磁饱和特性,在回转器-电容建模中引入了磁开关元件,简化了已有的处理方法的计算,仿真结果表明了该处理方法的可行性和准确性.最后,针对在建立各类等效电路模型过程中存在的参数确定难问题,指出利用电磁场分析软件可以解决这一问题.

**关键词:** 磁集成技术;磁件等效电路模型;磁饱和

中图分类号: TM462 文献标识码: A 文章编号: 0253 987X(2005)10 1106 05

### Research of Equivalent Circuit Model of Magnetic Component in Magnetic Integration Technology

*Xu Liping<sup>1</sup>, Wang Zhongyi<sup>1</sup>, Gu Shenhui<sup>1</sup>, Song Yu<sup>2</sup>*

(1 School of Electrical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China;

2 .Center of Micro-Electronics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** Equivalent circuit models of magnetic component are summarized and a new model is proposed, where the structure of magnetic component is reflected and the circuit analysis is carried out flexibly . The relationship figures of four kinds of equivalent models of magnetic component are gained with this model, and the identity of these four kinds of models is confirmed . To simplify the computing method of magnetism saturation, a magnetism switch component is designed in gyrator-capacitor model . The simulation result indicates the feasibility and accuracy of this method . Furthermore, the difficulty of calculating parameters in developing equivalent circuit can be solved by the aid of electro-magnetic field analysis software .

**Keywords:** *magnetic integration technique; equivalent circuit model of magnetic component; magnetism saturation*

磁性元件是电源中的重要功能元件,是实现能量储存与转换、滤波和电气隔离的主要元件<sup>[1]</sup>。随着人们对电源的要求越来越高,研发人员对变换器中的磁件做了大量的研究工作,其中磁集成技术在电源中的应用越来越被人重视,建立磁件等效电路模型是分析集成磁件(IM)的基础。目前,分析磁件主要用 4 类磁件等效电路模型:磁阻磁路等效模型,电

感、变压器表征的等效模型,回转器、电容表征的等效电路模型以及自感互感等效模型。本文介绍了各模型的特点,总结出它们之间的内在关系,并提出了新的模型。以回转器-电容模型为例,介绍了加入磁件非线性和损耗等特性,建立其扩展完善模型的方法,并提出用磁开关解决磁饱和问题,简化了以前方法的计算。

# 1 建立磁件等效电路模型的理论依据

建立磁件等效电路模型的理论依据如下.

(1)电磁感应定律、磁动势定义式

$$v = N \dot{\phi}; i = H N \quad (1)$$

(2)磁通连续性原理、安培环路定律和磁路的欧姆定律

$$i_{in} = i_{out}; F_m = \oint H \cdot dl; U_m = R \phi \quad (2)$$

磁件建模理论依据之间的内在联系可用图 1 来表示<sup>[2]</sup>.

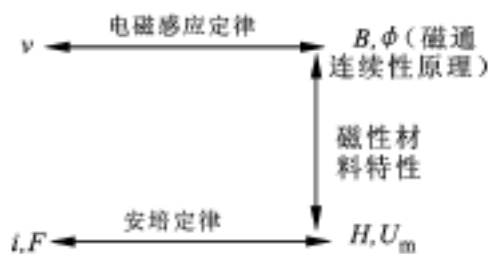


图 1 磁件建模理论依据总结

# 2 各类磁件等效模型及其内在联系

以如图 2a 和图 2c 所示的电感和变压器为例进行介绍,并假定磁心始终工作在线性区,磁导率为常数.

## 2.1 磁阻磁路等效模型

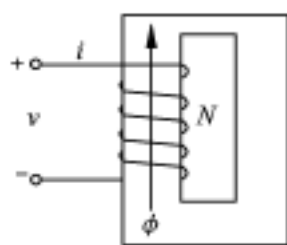
电感和变压器的磁阻磁路模型如图 2b、图 2d 所示.该类模型的缺点是没有体现电磁感应定律,不能完整反映磁件工作原理,优点是建模简便,能够直观反映磁件结构,是建立其他各类模型的基础.

## 2.2 回转器、电容表征的等效电路模型

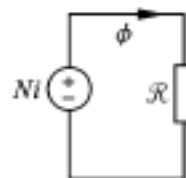
回转器、电容表征的等效电路模型是根据 Buntentbach 提出的磁路参数和电路参数的类比关系(如表 1 所示),直接由磁阻磁路模型建立起来的<sup>[3]</sup>,如图 3 所示.该模型用回转器替代磁件中的线圈,来联系电路与磁路、电容及电容间的拓扑表征磁路的基本定律,因此该模型能完整的体现磁件基本工作

表 1 Buntentbach 提出的磁路参数和电路参数的类比关系

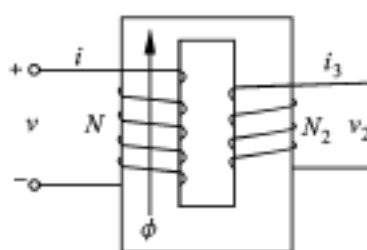
磁路参数	电路参数
磁动势 ( $F$ )	电压 ( $v$ )
磁通变化率 ( $\dot{\phi}$ )	电流 ( $i$ )
磁导 ( $\mu$ )	电容 ( $C$ )
磁通 ( $\phi$ )	电荷 ( $q$ )
磁导率 ( $\mu$ )	电导率 ( $\sigma$ )



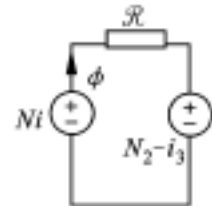
(a)电感



(b)电感等效电路

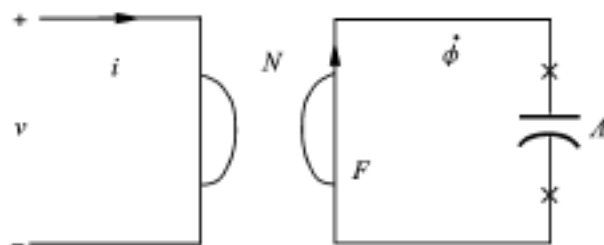


(c)变压器

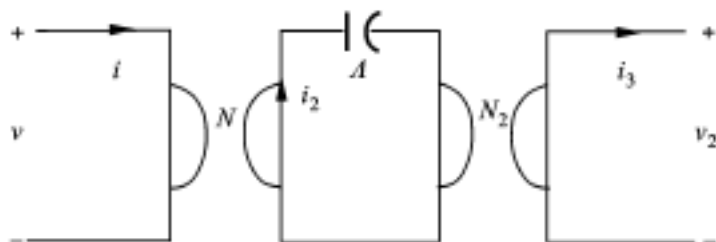


(d)变压器等效电路

图 2 磁阻磁路模型



(a)回转器



(b)回转器电容模型

图 3 回转器 电容模型

原理.

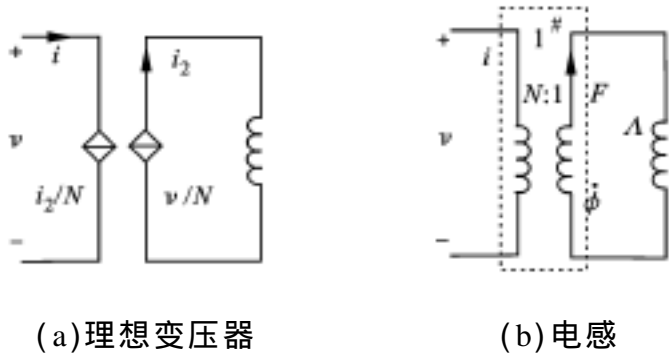
回转器、电容表征的等效电路模型建模过程简单、直接,方便用于电路仿真,此外该模型的磁心特性参数相对独立,磁心的饱和、滞环等特性可以较方便地加入其中<sup>[4]</sup>.但是,利用回转器替代线圈,给电路分析带来了不便.

## 2.3 电感、变压器表征的等效模型

2.3.1 从回转器 电容模型推导新模型 根据电路中的对偶原理,如果导出了电路某一个关系式和结论,就等于解决了与它对偶的另一关系式和结论<sup>[5]</sup>.在建模中,如果推导出一种等效电路模型有效,相应地其对偶电路模型也同样有效.

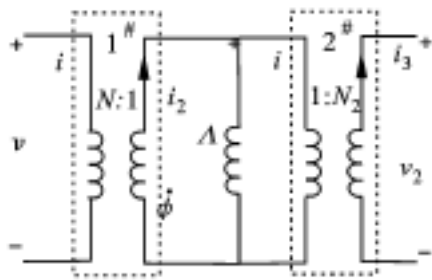
电感的回转器 电容模型如图 3a 所示,通过对偶变换得到其对偶电路图 4b.其对偶原则如下:串联与并联互换;参数为  $N$  的回转器与变比为  $N-1$

的理想变压器互换;电容值为 的电容与电感值为 的电感互换.回转器与变压器的对偶关系证明如下.



(a)理想变压器

(b)电感



(c)变压器

图4 新等效模型

回转器  $v_1$ 、 $v_2$  可表示为

$$v_1 = Ni_2; \quad v_2 = Ni_1 \quad (3)$$

现设定

$$v_1 = Ri \quad (4)$$

则

$$v_2 = N^2 i_2 / R \quad (5)$$

根据对偶原理,可以得到对偶关系式

$$i_1 = v_1 / R \quad (6a)$$

$$i_2 = N^2 R v_2 \quad (6b)$$

从而证明了回转器与式(6)对偶.

变比为  $N:1$  的理想变压器可用图 4a 所示的两个数控源表示,表达式为

$$v_1 = Nv_2; \quad i_2 = Ni_1 \quad (7)$$

式(6a)结合式(7),可以得到式(6b),从而证明了理想变压器与式(6)等效,因此回转器与理想变压器为对偶元件.图 4b 所示为电感的新模型,同理可得变压器的新模型如图 4c 所示,进而可推出任意结构磁件对应的新模型.

2.3.2 新模型的建立步骤及其特点 新模型属于电感、变压器表征的等效电路模型,由于它是通过回转器-电容模型对偶转换得到的,也可称为回转器-电容对偶模型.新模型中磁动势  $F$  类比于电路中的电流,磁通变化率 类比于电路中的电压,代入式(1),就可得到式(7),因此理想变压器包含了  $F$ 、磁路的特性参数,其变比为  $N:1$  ( $N$  为线圈匝数).

电感元件的电感值为磁导值,表达式为  $v dt = i$ , 即

$$dt = F = F \quad (8)$$

电感反映了磁路中的欧姆定律,因此磁路上各种关系都能反映出来.

新模型可以通过磁阻磁路模型得到,运用对偶原理,得到磁阻磁路模型的对偶拓扑图,然后根据表 2 所示磁路参数和电路参数的类比关系直接导出.

表2 本文提出的磁路参数和电路参数的类比关系

磁路参数	电路参数
磁动势 ( $F$ )	电流 ( $i$ )
磁通变化率 ( )	电压 ( $v$ )
磁导 ( )	电感 ( $L$ )
磁通 ( )	磁通 ( )
磁导率 ( $\mu$ )	磁导率 ( $\mu$ )

新模型用理想变压器表征磁件中的线圈,反映电路与磁路之间的联系,电感拓扑结构反映磁路的对偶拓扑图.该模型可以完整地反映磁件的基本工作原理,模型中的磁心特性参数相对独立,磁心的饱和、滞环等特性可以较方便地加入其中,得到其扩展完善模型.

新模型的建立方法比较直观、简洁,可以方便地确定模型中的参数,人们更容易接受用电感、变压器表征的磁件电路等效模型.模型中的理想变压器变比为其所表征线圈的匝数,而理想变压器电路推导相对于回转器电路推导要简便.该模型与常用电路相通,便于电路的直接分析、比较.它与电感-变压器等效模型相比,模型中参数的物理意义更明确.

2.3.3 电感-变压器模型 以电感变压器为例,设外加电源电压的线圈为输入线圈,根据理想变压器中阻抗变换公式  $Z_n = N^2 Z$ ,可以消去图 4b 中的 1# 理想变压器,即消去输入线圈所对应的理想变压器,得到图 5a 所示的模型就是电感-变压器模型<sup>[6]</sup>.同理,可以消去变压器中输入线圈所对应的理想变压器,得到图 5b 所示的变压器的对应模型.

### 2.4 自感互感模型

对于电感-变压器模型,利用电路拓扑结构,分析一线圈电压与另一线圈电流的关系,得到两线圈之间的互感值.分析线圈电压与自身电流的关系,得到自感值,从而推出自感互感等效电路模型<sup>[7]</sup>,图 6

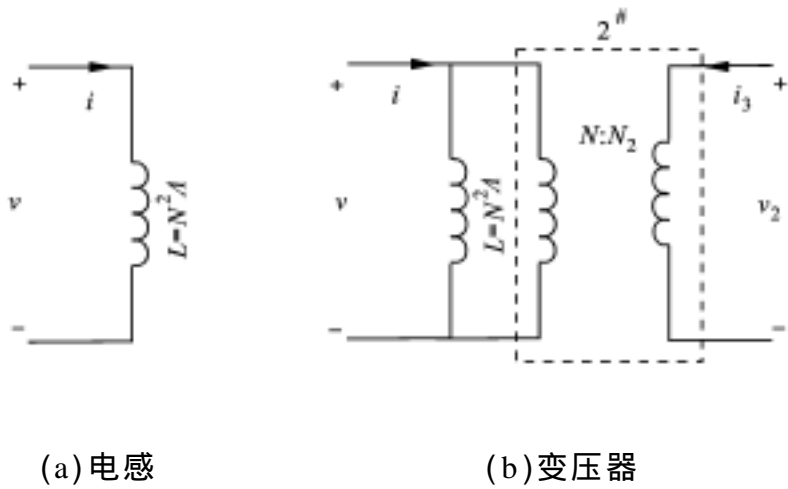


图 5 电感 变压器模型

所示为电感与变压器的自感互感等效电路模型.采用这类模型进行电路分析最为方便,但这种模型的建模过程计算复杂,模型所需参数多,磁心的饱和、滞环等特性难以加入其中,假如非线性非常严重,该模型计算出的结果误差大,并且该模型不能反映磁件的内部拓扑,不能分析磁件内部特性.

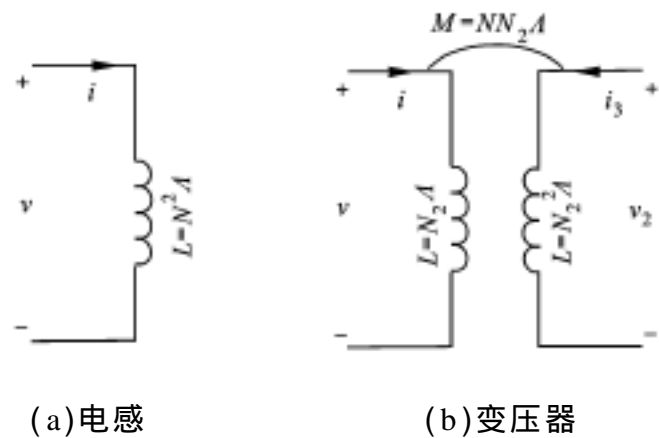


图 6 自感互感模型

### 2.5 4 类模型之间的关系

磁阻磁路等效模型是其他各类模型的源头,通过 Buntentbach 磁路参数和电路参数的类比关系可以得到回转器-电容模型,通过本文提出的磁路参数和电路参数类比关系可以得到新模型.新模型与回转器-电容模型互为对偶电路.通过变压器阻抗变换公式,消去输入线圈所对应的理想变压器,新模型就可化为电感-变压器模型,新模型与电感-变压器模型同属于电感变压器等效模型.线圈的自感互感可以通过电感-变压器等效模型电路计算得到,即消去模型中的所有理想变压器,建立其自感互感矩阵;自感互感也可以通过回转器-电容模型得到,即消去模型中所有的回转器,建立其自感互感矩阵.各类模型之间可以相互转化,因此它们具有统一性,其内在联系如图 7 所示.

## 3 磁件的扩展完善模型

上述模型的建立是在理想线性化基础上进行

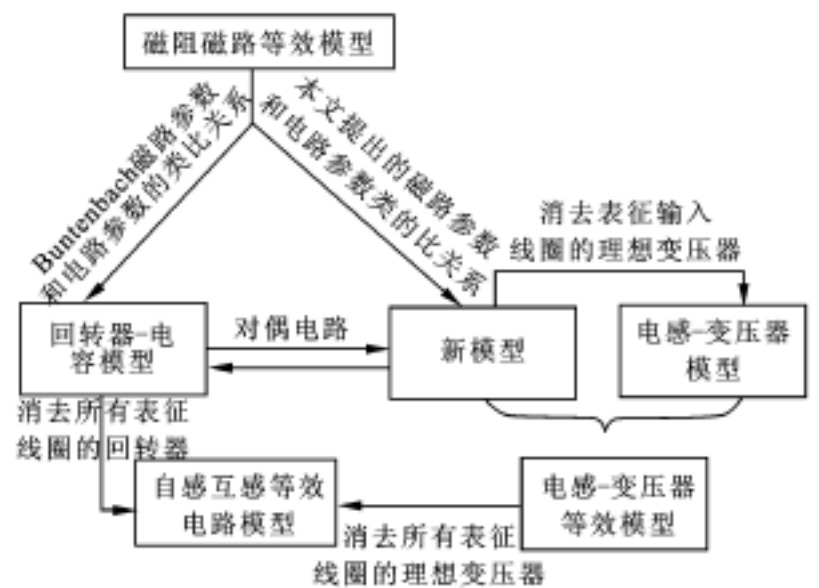


图 7 4 类等效电路模型相互关系的总结图

的,在实际工作中,磁导率不恒为常数,与磁场大小、频率高低有关, B-H 曲线存在滞环、磁饱和现象,磁心具有涡流效应,实际中的线圈存在电阻,并受邻近效应、集肤效应的影响,使电阻进一步增大,绕组与磁心间还存在漏磁通.所以,需要完善上面介绍的模型,将磁心的饱和、滞环等特性加入其中,本文称其为扩展完善模型,从而更贴切地再现磁件实际的工作特性.

各类模型之间可以相互转换,具有统一性,因此介绍一类磁件等效电路模型的扩展完善模型,其他类模型的扩展完善模型可以通过它们之间的关系推导出来.本文扼要介绍回转器-电容等效电路模型的扩展完善模型,并针对磁饱和提出一种新的扩展完善模型.

回转器-电容扩展完善模型的处理方法如下:给回转器并联电容来表示漏感的影响,认为漏感在理论上就是磁通产生了分流;串联电阻来表示铜耗和磁心损耗,如回转器-电容-电阻磁心等效模型;

Hamill 提出的采用压控电压源等效磁心饱和<sup>[3]</sup>,很好地模拟了磁饱和以及 B-H 曲线的非线性,但是确定受控表达式的步骤很繁琐,表达式结构复杂,给后面的电磁路分析计算以及设计磁件带来计算上的麻烦.

本文设想在回转器-电容模型中的电容支路上串联磁开关,如图 8 所示,可以解决计算复杂的问题.磁开关为常闭开关,与它串联的电容上的电压控



图 8 加入磁开关的扩展完善模型

制它的开启、闭合。当该电容电压  $v_c$  比较小时,磁阻上的磁动势比较小,亦即磁心未达到饱和,磁开关闭合;当  $v_c$  超过磁件临界饱和的磁动势时,磁阻上的磁动势非常大,磁心已经达到饱和,磁开关打开。

从图9看出,磁开关引入后的仿真与实际基本吻合,误差在可接受的范围之内,最重要的是它形象地等效了磁饱和问题,使磁路分析更为简便。

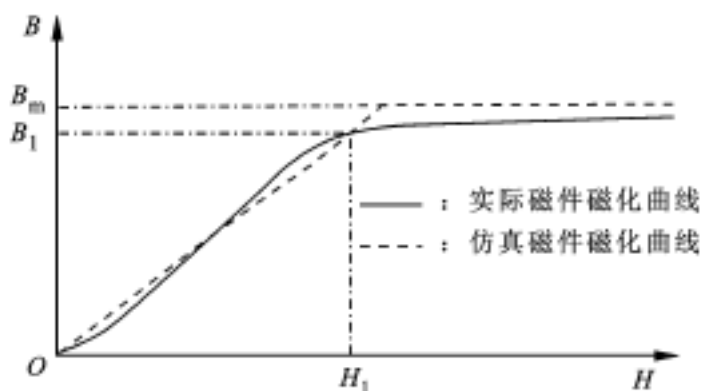


图9 仿真与实际磁化曲线的比较

#### 4 建立模型存在的困难及解决方法

由于影响磁件工作的因素非常多以及磁心的非线性问题,建立一个理想的磁件等效电路模型是非常困难的。现存的模型基本上能满足现实的需要,能近似反映磁件实际工作特性,但模型中存在着参数确定不准确,以及确定参数公式太复杂的问题。

现在磁场分析计算软件已经非常普及,操作简单易于掌握,利用这些软件进行电磁场计算可以确定模型的参数,其参数准确度要比套用经验公式高许多,而且在分析的过程中,可以详细了解磁件实际磁场分布,提出优化磁件的措施。另外,加深对磁心材料的研究,挖掘出更为准确更为简洁的经验公式,亦可解决参数确定不准确的问题。

#### 5 结论

本文总结出了现存的4类磁件等效电路模型之间的转换关系,指出它们具有统一性,并且提出了一种新模型。新模型的总体性能是回转器-电容模型和电感-变压器模型两者性能的折中,是一种非常理想的模型。文章概述了加入磁件磁心的饱和、滞环等特性的扩展完善模型,提出了磁开关模型,比以往解决磁饱和特性的扩展完善模型简化了计算。最后,指出了现在建模存在参数确定不准确的问题,提出了利用磁场分析计算软件可以很好地解决该问题。

#### 参考文献:

- [1] 陈乾宏.开关电源中磁集成技术的应用研究[D].南京:南京航空航天大学,2001.
- [2] 杨玉岗.现代电力电子的磁技术[M].北京:科学出版社,2003.
- [3] Hamill D C. Lumped equivalent circuits of magnetic components: the gyrator-capacitor approach [J]. IEEE Tran on PE, 1993,8(2):97-103.
- [4] 陈乾宏,阮新波,严仰光.开关电源中磁集成技术及其应用[J].电工技术学报,2004,19(3):1-8.
- [5] 邱关源.电路[M].第三版.北京:高等教育出版社,1989.
- [6] 蔡宣三,龚绍文.高频功率电子学[M].北京:科学出版社,1993.
- [7] Lee Y S, Wong L P, Cheng David K W. Simulation and design of integrated magnetics for power converters[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2003,39(2):240-250.

(编辑 杜秀杰)

[文摘预登]

### 伙伴选择问题正规解的存在性

李乃成, 靖稳峰, 徐宗本  
(西安交通大学理学院, 710049, 西安)

基于虚拟企业管理中伙伴选择问题的整数规划模型,从理论上分析了它的性态,证明了其正规解的存在性。在单位时间拖期罚款不小于投资利息的条件下,获得了最佳工期必是预定工期的结论。所得结果对于该类问题的研究与求解以及制定工程拖期罚率提供了理论依据,对实际应用具有重要意义。