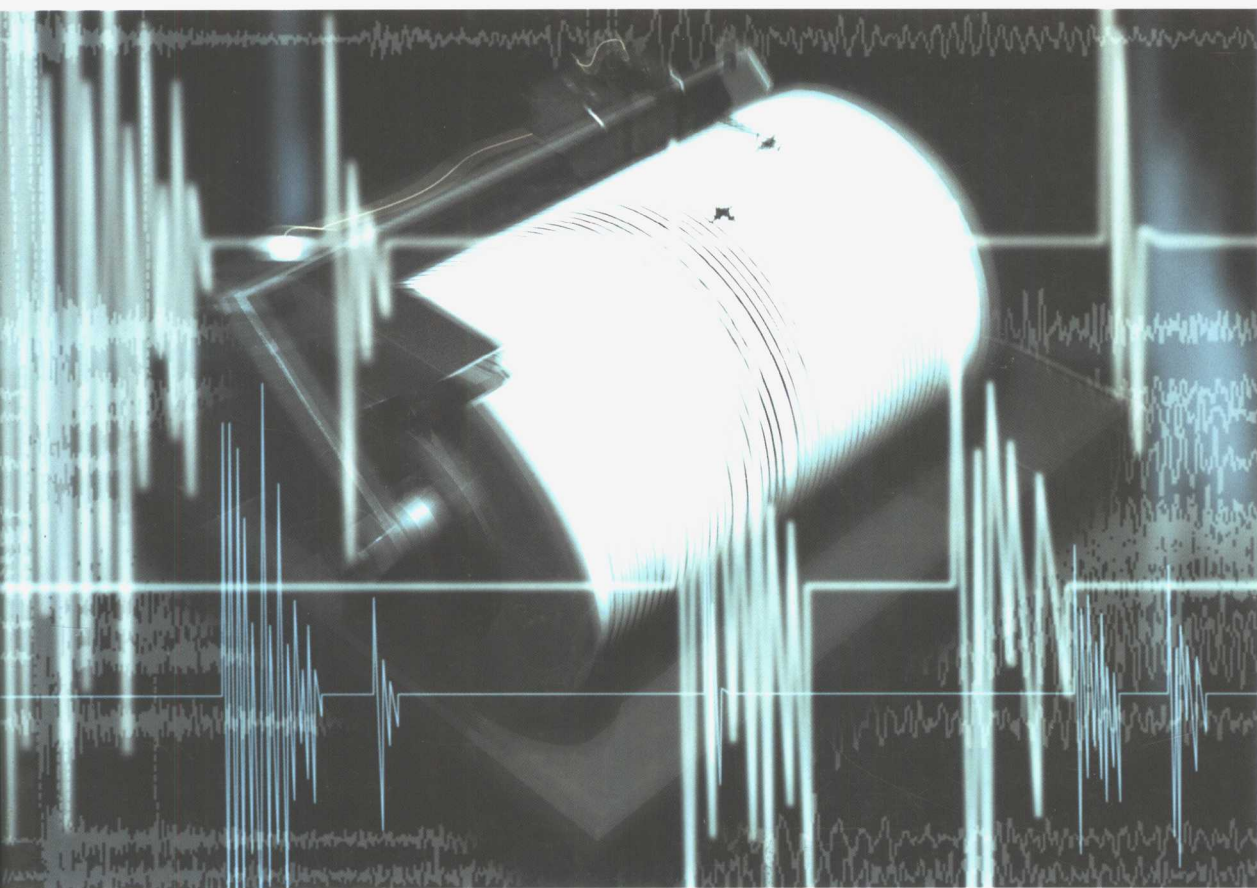


21 世纪高等院校教材

# 现代电力电子的磁技术

杨玉岗 编著



 科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

21 世纪高等院校教材

# 现代电力电子的磁技术

杨玉岗 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书从实用的角度出发,系统地论述了现代电力电子的磁技术,包括电力电子磁技术的理论基础,各种磁性材料铁心、磁性器件的线圈、开关电源和UPS中各种磁性器件和EMI滤波器设计方法,平面变压器和集成磁技术,磁性器件的测试技术,磁性材料的特性、型号和线圈骨架型号等。本书内容丰富,取材广泛,既注重对基础理论的介绍与阐述,又注重实用。每章有小结,并附有习题,便于初学者练习和复习。书中给出了各种规格的漆包线、各种磁性材料的特性和铁心型号及骨架型号,从而使读者可以方便地设计出各种常用的磁性器件。

本书可作为高等院校电力电子、电气工程和自动化等专业大学本科、研究生教材及科研与教学参考书,也可供从事开关电源、UPS和变频器等电力电子产品及电子变压器产品研制开发、使用和维护的科技人员和工程技术人员使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子的磁技术/杨玉岗编著. —北京:科学出版社,2003

(21世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-011547-3

I. 现… II. 杨… III. 电力电子学-磁学-高等学校-教材

IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 048353 号

责任编辑:马长芳/责任校对:宋玲玲

责任印制:刘秀平/封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003年8月第一次印刷 印张:21

印数:1—3 000 字数:413 000

定价:29.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

## 前 言

随着现代电力电子技术的不断发展,有关开关电源和 UPS 等现代电力电子设备中磁性器件的技术——现代电力电子的磁技术也在不断发展。磁性器件是电力电子技术和现代电源中重要的、不可缺少的组成部分,而现在高等院校中电气工程和电子工程等专业在大学生的培养教育计划中,对磁学、电磁理论等部分有所减弱,使得许多从事电力电子技术及电源技术的科技工作者感到不易掌握有关磁性器件的知识;再加上磁性器件的工作情况比较复杂,在选用磁性器件时又不像其他电子元件那样有现成的成品可供选择,而要进行设计,在设计时涉及的参数又太多,这些参数的测量也比较困难,更使人们感到对有关磁性器件的知识难以把握。

正是基于以上考虑,作者经过 6 年的研究与实践,编写了本书,目的在于为读者了解、学习和研究现代电力电子的磁技术提供一本比较实用的专门书籍。本书从实用角度出发,系统论述了现代电力电子的磁技术。本书的出版,将有助于高校电类专业的大学生、研究生、教师及社会上从事电力电子技术及电源技术工作的广大科技人员了解和熟悉这些基本内容以及有关电力电子和高频电源用磁性器件的新知识和新成果,从而为我国电力电子技术及电源技术的发展做出贡献。

本书共分 9 章和 5 个附录。第一章系统论述了现代电力电子磁技术的基本理论;第二章至第四章较全面地介绍了各种高频磁性材料,包括软磁铁氧体、金属磁粉芯(包括铁粉芯、铁硅铝粉芯、高通磁粉芯和坡莫合金粉芯)、坡莫合金、非晶及超微晶合金;第五章介绍了磁性器件的线圈,包括骨架、导体和绝缘材料等;第六章和第七章系统阐述了开关电源及 UPS 中各种磁性器件和 EMI 滤波器的设计方法;第八章介绍了现代电力电子磁技术的新成果,包括平面变压器和集成磁技术;第九章介绍了磁性器件的测试方法。附录 1 给出了各种铁氧体铁心的  $I^2L$  图;附录 2~附录 4 给出了各种磁性材料的特性、铁心型号、尺寸和有关参数;附录 5 给出了各种铁氧体铁心骨架的型号。

中国电源学会名誉理事长、清华大学蔡宣三教授在百忙中认真审阅了全部书稿,蔡老师还热情地为作者提供了他最近发表的论文,辽宁工程技术大学杨芳春教授也认真审阅了书稿,两位老师对书稿提出了许多宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢!科学出版社的马长芳老师为本书的出版做了大量工作,也特此致谢!

由于现代电力电子磁技术发展迅速,也由于作者水平有限,书中难免有不尽人意甚至错误之处,敬请读者批评指正!

本书的研究内容得到了国家自然科学基金项目的资助,项目资助号为:50207004。

本书的出版得到了辽宁工程技术大学专著出版基金的资助。

作 者

2003年4月

# 目 录

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| <b>第一章 现代电力电子磁技术的理论基础 .....</b>    | <b>1</b>   |
| 1.1 麦克斯韦方程组 .....                  | 1          |
| 1.2 根据麦克斯韦方程组分析磁路 .....            | 3          |
| 1.3 变压器和高频电感的电路模型 .....            | 14         |
| 1.4 磁性器件的铁心损耗和绕组直流铜耗 .....         | 20         |
| 1.5 变压器线圈导体中的涡流及涡流损耗 .....         | 23         |
| 1.6 小 结 .....                      | 38         |
| 习 题 .....                          | 39         |
| <b>第二章 高频软磁铁氧体磁性材料 .....</b>       | <b>44</b>  |
| 2.1 磁性材料的特性参数 .....                | 44         |
| 2.2 磁性器件铁心的三种工作状态 .....            | 53         |
| 2.3 开关电源中铁氧体铁心的选择方法 .....          | 58         |
| 2.4 国内外一些厂商生产的铁氧体材料特性 .....        | 72         |
| 2.5 PHILIPS 公司的铁氧体铁心型号 .....       | 73         |
| 2.6 小 结 .....                      | 74         |
| 习 题 .....                          | 74         |
| <b>第三章 金属磁粉芯磁性材料 .....</b>         | <b>75</b>  |
| 3.1 铁粉芯磁性材料 .....                  | 75         |
| 3.2 铁硅铝粉芯磁性材料 .....                | 91         |
| 3.3 高通磁粉芯磁性材料 .....                | 98         |
| 3.4 坡莫合金粉芯磁性材料 .....               | 105        |
| 3.5 小 结 .....                      | 113        |
| 习 题 .....                          | 114        |
| <b>第四章 坡莫合金及非晶、超微晶合金磁性材料 .....</b> | <b>115</b> |
| 4.1 坡莫合金磁性材料 .....                 | 115        |
| 4.2 超坡莫合金磁性材料 .....                | 121        |
| 4.3 非晶合金磁性材料 .....                 | 126        |
| 4.4 超微晶合金磁性材料 .....                | 132        |
| 4.5 各种磁性材料的性能比较 .....              | 135        |
| <b>第五章 磁性器件的线圈 .....</b>           | <b>137</b> |

|                                               |            |
|-----------------------------------------------|------------|
| 5.1 磁性器件的骨架 .....                             | 137        |
| 5.2 磁性器件的导电体 .....                            | 138        |
| 5.3 磁性器件的绝缘和绝缘材料 .....                        | 141        |
| 5.4 小 结 .....                                 | 146        |
| <b>第六章 开关电源中磁性器件的设计</b> .....                 | <b>148</b> |
| 6.1 几种常用磁性器件铁心的工作状态 .....                     | 148        |
| 6.2 高频变压器的设计 .....                            | 155        |
| 6.3 直流输出滤波电感的设计 .....                         | 168        |
| 6.4 EMI 滤波器的设计 .....                          | 173        |
| 6.5 小 结 .....                                 | 182        |
| 习 题 .....                                     | 183        |
| <b>第七章 在线式 UPS 中磁性器件的设计</b> .....             | <b>188</b> |
| 7.1 PFC 电感器的设计 .....                          | 188        |
| 7.2 逆变器输出滤波电感的设计 .....                        | 195        |
| 7.3 逆变器输出变压器的分析 .....                         | 203        |
| 7.4 小 结 .....                                 | 205        |
| <b>第八章 平面变压器和集成磁技术</b> .....                  | <b>207</b> |
| 8.1 平面变压器 .....                               | 207        |
| 8.2 集成磁技术 .....                               | 209        |
| 8.3 平面集成磁件 .....                              | 212        |
| <b>第九章 磁性器件的测试</b> .....                      | <b>213</b> |
| 9.1 电感量和漏感量的测试 .....                          | 213        |
| 9.2 绝缘电阻和抗电强度的测试 .....                        | 214        |
| 9.3 变压器同名端的测试 .....                           | 214        |
| 9.4 其他量的测试 .....                              | 215        |
| 9.5 温升测试 .....                                | 215        |
| <b>参考文献</b> .....                             | <b>216</b> |
| <b>附录 1 各种型号铁心的 <math>I^2L</math> 图</b> ..... | <b>218</b> |
| <b>附录 2 国内外一些厂商生产的铁氧体材料特性</b> .....           | <b>226</b> |
| 附录 2.1 PHILIPS 公司的铁氧体磁性材料特性 .....             | 226        |
| 附录 2.2 TDK 公司的铁氧体磁性材料特性 .....                 | 248        |
| 附录 2.3 西门子公司铁氧体磁性材料特性 .....                   | 250        |
| 附录 2.4 金宁无线电器材厂的铁氧体磁性材料特性 .....               | 260        |
| 附录 2.5 浙江海宁天通公司的铁氧体磁性材料特性 .....               | 261        |
| <b>附录 3 PHILIPS 公司的铁氧体铁心型号</b> .....          | <b>262</b> |

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 附录 3.1 E 形铁心的型号、尺寸及有关参数 .....               | 262        |
| 附录 3.2 平面 E 形铁心的型号、尺寸及有关参数 .....            | 267        |
| 附录 3.3 EC 形铁心的型号、尺寸及有关参数 .....              | 269        |
| 附录 3.4 EFD 形铁心的型号、尺寸及有关参数 .....             | 270        |
| 附录 3.5 ER 形铁心的型号、尺寸及有关参数 .....              | 272        |
| 附录 3.6 ETD 形铁心的型号、尺寸及有关参数 .....             | 274        |
| 附录 3.7 U、I 形铁心的型号、尺寸及有关参数 .....             | 275        |
| 附录 3.8 环形铁心的型号、尺寸及有关参数 .....                | 277        |
| 附录 3.9 棒形铁心的型号、尺寸及有关参数 .....                | 284        |
| <b>附录 4 MICROMETALS 公司铁粉芯型号、尺寸和参数 .....</b> | <b>285</b> |
| 附录 4.1 环形铁心 .....                           | 285        |
| 附录 4.2 复合铁心 .....                           | 292        |
| 附录 4.3 E 形铁心 .....                          | 294        |
| 附录 4.4 EF 形铁心 .....                         | 298        |
| 附录 4.5 EM 形铁心 .....                         | 298        |
| 附录 4.6 E 形铁心的骨架 .....                       | 299        |
| 附录 4.7 汇流棒形铁心 .....                         | 299        |
| 附录 4.8 U 形铁心 .....                          | 300        |
| <b>附录 5 铁氧体铁心的骨架型号和参数 .....</b>             | <b>301</b> |
| 附录 5.1 E 形铁心的骨架 .....                       | 301        |
| 附录 5.2 平面 E 形铁心的骨架 .....                    | 310        |
| 附录 5.3 EC 形铁心的骨架 .....                      | 310        |
| 附录 5.4 EFD 形铁心的骨架 .....                     | 313        |
| 附录 5.5 EP 形铁心的骨架 .....                      | 317        |
| 附录 5.6 ER 形铁心的骨架 .....                      | 318        |
| 附录 5.7 ETD 形铁心的骨架 .....                     | 319        |
| 附录 5.8 P、P/I、PT、PTS 形铁心的骨架 .....            | 321        |
| 附录 5.9 RM、RM/I、RM/ILP 形铁心的骨架 .....          | 325        |
| 附录 5.10 U、I 型号铁心的骨架 .....                   | 326        |



# 第一章 现代电力电子磁技术的理论基础

高频电感和高频变压器等磁性器件是现代电力电子装置(如开关电源和不间断电源(UPS)等)的核心部件,对这些磁性器件进行分析和设计是现代电力电子技术的重要内容。本书把分析和设计现代电力电子装置中磁性器件的有关理论与技术称为现代电力电子的磁技术,并拟进行较系统和全面的论述。书中提到的磁性器件主要是指现代电力电子装置中的高频电感和高频变压器。

本章主要介绍了现代电力电子磁技术的理论基础,包括麦克斯韦方程组,用麦克斯韦方程组分析磁性器件的磁路,磁性器件的磁路模型和电路模型;磁性器件的损耗机理;在高频大电流工作时磁性器件的饱和、磁滞、涡流、集肤效应和邻近效应以及由集肤效应和邻近效应在磁性器件绕组中所产生的铜耗等内容。

## 1.1 麦克斯韦方程组

在 18、19 世纪,库仑、亨利、法拉第、安培、高斯和赫兹等人进行了很多有关电磁现象的实验,提出了许多描述电磁场的定律,后来,麦克斯韦(Maxwell)等人对这些定律作了归纳总结和理论抽象,进而发展成为一套非常简洁的描述宏观电磁现象基本规律的方程组,这就是麦克斯韦方程组,如表 1.1 所示。这些方程的正确性在后来的实际运用中都得到了证实,从而为电磁理论的发展与应用奠定了基础。

表 1.1 麦克斯韦方程组

|         | 积分形式                                                                                                                                             | 微分形式                                                                             |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 电磁感应定律  | $\oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \frac{\partial}{\partial t} \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$                                      | $\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$            |
| 安培环路定律  | $\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \frac{\partial}{\partial t} \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}$ | $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ |
| 磁通连续性原理 | $\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$                                                                                                       | $\nabla \times \mathbf{B} = 0$                                                   |
| 高斯定律    | $\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q$                                                                                                       | $\nabla \times \mathbf{D} = \rho_v$                                              |

麦克斯韦方程组的基本变量为四个场向量(电场强度  $\mathbf{E}$ 、磁感应强度  $\mathbf{B}$ (也叫磁通密度)、电位移  $\mathbf{D}$  和磁场强度  $\mathbf{H}$ )以及两个源变量(电流密度  $\mathbf{J}$  和电荷密度  $\rho_v$ )。

电磁感应定律(又称法拉第定律)揭示了磁场和电场可以相互感应。奥斯特用实验证实了电流可以产生磁场,法拉第则证实了变化的磁场可以产生电场。

安培环路定律表明,在磁场中,不论磁介质与磁场强度向量  $\mathbf{H}$  如何分布, $\mathbf{H}$  沿任一闭合回路  $\mathbf{l}$  的线积分等于穿过该积分路径所包围的曲面  $S$  内的总电流,该总电流包括由自由电荷运动而产生的传导电流和由电场变化而造成的位移电流。 $\mathbf{J}$  为传导电流密度向量,简称电流密度, $\partial \mathbf{D} / \partial t$  为位移电流密度,位移电流并不表示真正的电荷流动,而是表示电场的变化率。

磁通连续性原理(也叫高斯磁通定律)表明,在磁场中,不论磁介质与磁通密度向量  $\mathbf{B}$  如何分布,穿出任何一个闭合曲面  $S$  的磁通量  $\Phi$ (简称磁通,即磁通密度向量  $\mathbf{B}$  对该闭合曲面的有向积分)恒等于零。也就是说磁力线是连续的。

高斯定律(也叫高斯电通定律)表明,在电场中,不论电介质与电位移向量  $\mathbf{D}$  如何分布,穿出任何一个闭合曲面  $S$  的  $\mathbf{D}$  通量(即电位移向量  $\mathbf{D}$  对该闭合曲面  $S$  的有向积分)等于这一闭合曲面所包围的自由电荷量  $q$ ,即电荷可以产生电场,也就是说电荷是电场的源,并且电场方向(也可以形象地用电力线来表示)起始于正电荷而终止于负电荷,同时也说明电力线是不连续的,这揭示了磁场与电场的一项重要区别。

总之,麦克斯韦方程组反映了各场量(即  $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{D}$ 、 $\mathbf{H}$ )和场源(即电荷和电流)之间的关系。它表明,电场不仅由电荷产生,也由变化的磁场产生,磁场不仅由传导电流产生,也可由位移电流即变化的电场产生,研究电磁场是以该方程组为理论依据的。该方程组有积分和微分两种形式,无论是积分形式还是微分形式,都可用来进行电磁场的分析和计算,根据该方程组和给定的边值及初始值,可以得出惟一解。

电磁介质中四个基本场向量的关系为

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H} \quad (1.1a)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \cdot \mathbf{E} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \mathbf{E} \quad (1.1b)$$

$$\mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E} \quad (1.1c)$$

式中, $\mu$  为磁导率, $\mu_0$  为真空磁导率( $4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ ), $\mu_r$  为介质的相对磁导率。空气的相对磁导率近似等于 1,相对磁导率小于 1 的介质称为抗磁介质,如铜和铝;相对磁导率稍大于 1 的介质称为顺磁介质;相对磁导率远远大于 1 的介质称为铁磁介质,铁磁介质材料含有铁、镍、钴等元素,例如一般硅钢的相对磁导率为几千,电力电子装置中常用的磁性器件的铁心材料如铁氧体的相对磁导率一般为几百到几千,磁粉芯的相对磁导率为几十到几百,坡莫合金的相对磁导率可到几十万,非晶材料的相对磁导率可到几百万。 $\epsilon$  为介质的介电常量, $\epsilon_0$  为真空的介电常量

$(8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m})$ ,  $\epsilon_r$  为介质的相对介电常量,  $\gamma$  为介质的电导率( $1/\Omega \cdot \text{m}$ )。

如果介质的物理特性(即  $\mu$ 、 $\epsilon$  和  $\gamma$ )在各点都保持一致,即与位置无关,则该介质称为均匀介质,否则称为非均匀介质。如果介质的物理特性在各个方向上都保持一致,即与方向无关,则该介质称为各向同性介质,否则称为各向异性介质。如果介质的物理特性不随时间变化,则该介质称为时不变介质,否则称为时变介质。如果介质的物理特性不随电磁激励而变化,即  $\mu$ 、 $\epsilon$  和  $\gamma$  保持常值,则该介质称为线性介质,否则称为非线性介质。磁性器件的铁心材料是均匀、各向同性、时不变、非线性的铁磁介质。

电力电子装置的开关频率  $f$  通常在 1MHz 以下,最高不超过 100 MHz,所以当  $f$  小于 1MHz 时,其磁性器件中电磁场的波长  $\lambda > c/f = 3\text{km}$  ( $c$  为光速),远远大于磁性器件的尺寸,即使  $f$  达到 100 MHz,其波长也远远大于磁性器件的尺寸,因为此时磁性器件的尺寸不超过几厘米,因此,电磁波传播的推迟作用可以忽略不计,即给定某一瞬间的源,就可以确定同一瞬间的场,而与稍早瞬间的源状态无关,从而可以用恒定磁场的规律来分析磁性器件的磁场,用静电场的规律来分析磁性器件的电场。

磁性器件的线圈导体通常为铜导体,其电导率  $\gamma \gg \epsilon \cdot \omega$  ( $\omega$  为激励源的角频率),故在线圈导体内可以忽略位移电流效应,即  $\partial \mathbf{D} / \partial t = 0$ 。

表 1.1 中的麦克斯韦方程组就是电力电子磁技术的理论基础,是分析和设计磁性器件的理论依据。下一节将用这些方程来分析磁性器件。

## 1.2 根据麦克斯韦方程组分析磁路

磁性器件内有磁路和电路,磁性器件的尺寸和性能在很大程度上取决于磁路所用磁性材料的性能。本节先介绍磁路的概念,然后介绍麦克斯韦方程组在磁路中的表述形式,最后介绍磁性器件磁路的分析方法及等效磁路模型。

### 1.2.1 磁路

磁通所经过的路径就称为磁路。

在磁性器件中,为了得到较强的磁场,常把导线绕成线圈,再把线圈装在用铁磁性材料所做的铁心上,以实现聚磁的作用。这样,当线圈内通有电流时,由于铁心的导磁性能好,绝大部分磁通被约束在铁心内部并形成回路,这就构成了磁路。载流线圈中流过用以产生(或叫激励)磁路中磁通的电流,通常称为激磁电流(或励磁电流)。

对于如图 1.1 所示的变压器,当线圈中通有激磁电流时,铁心磁路(有时包括气隙)中将产生一定的磁感应强度并通过较多的磁通,这部分磁通称为主磁通  $\Phi$ 。

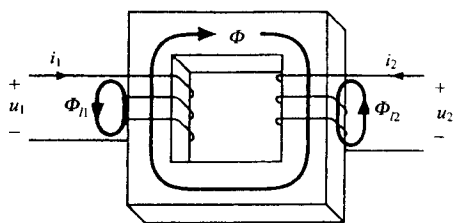


图 1.1 变压器的磁路

主磁通是磁性器件赖以工作的磁通。此外,围绕着载流线圈,在部分铁心和铁心周围的空间内,还会产生一些分散的、较小的磁通,这部分磁通称为漏磁通  $\Phi_l$ 。主磁通的路径容易确定,漏磁通的路径则比较复杂,需用专门的方法进行计算。考虑到在正常工作情况下,漏磁通所占的百分数一般都比较小,常常忽略不计,所以在下面的分析中,先将漏磁通忽略不计,着重说明主磁通所经过磁路的分析方法。漏磁通的影响放在本节最后及 1.3.3 小节中进行介绍。

构成磁路后,1.1 节所介绍的用麦克斯韦方程组分析磁性器件磁场(一般需求数值解)的问题就可以简化为分析磁路的问题,从而可以得到解析解。所谓磁路分析就是指:为使磁路中具有所需的磁通量,激磁线圈应绕多少匝,激磁电流应有多大,即应有多少激磁安匝;或给一定的激磁安匝,要求算出磁路中有多少磁通量。磁路分析在磁性器件的分析中占有相当重要的地位。下面说明如何根据表 1.1 所示的麦克斯韦方程组进行磁性器件的磁路分析。

### 1.2.2 麦克斯韦方程组在磁路中的表述形式

在进行磁性器件的磁路分析之前,先要给出麦克斯韦方程在磁路中的表述形式。

#### 1. 电磁感应定律

当磁场随时间变化时,在同一空间内将产生感应电场,根据法拉第电磁感应定律,电场强度  $\mathbf{E}$  围绕着一闭合回路的线积分等于穿过该回路磁通变化率的负值,如表 1.1 中的第一式所示。

对于如图 1.2 所示的磁性器件中的某个单匝线圈,其感应电势为:  $e = \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}$ , 通过单匝线圈的磁通为:  $\Phi = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$ , 则单匝线圈上的感应电势为

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2a)$$

式中的负号表示根据图 1.2(a)所规定的感应电势的正方向(即规定感应电势的正方向使之与回路交链的磁通  $\Phi$  的方向成右手螺旋关系),当  $\Phi$  增加时,  $d\Phi/dt > 0$ ,  $e < 0$ , 如图 1.2(b)所示;当  $\Phi$  减小时,  $d\Phi/dt < 0$ ,  $e > 0$ , 如图 1.2(c)所示,符合楞次定律。楞次定律指出:感应电势及其所产生的感应电流总是试图阻止回路中磁通

的变化。

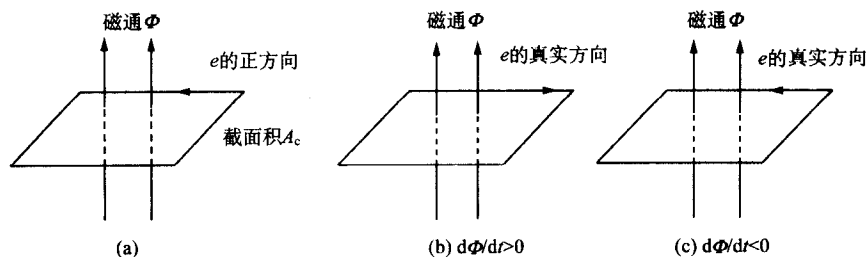


图 1.2 感应电势的方向

因为图 1.2 所示的磁性器件线圈所包围的磁通  $\Phi$  在线圈内可以看成是均匀分布的, 设线圈所包围的截面积为  $A_c$ , 则式(1.2a)可用磁通密度  $B$  表示为

$$e = -A_c \frac{dB}{dt} \quad (1.2b)$$

如果线圈的匝数不是 1, 而是  $n$ , 且  $n$  匝线圈是全耦合的, 即通过所有  $n$  匝线圈的磁通均为  $\Phi$ , 则式(1.2a)和(1.2b)可分别写为

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt}, \quad e = -nA_c \frac{dB}{dt} \quad (1.3)$$

## 2. 安培环路定律

安培环路定律表述为: 在磁场中, 磁场强度向量沿任一闭合路径的线积分等于穿过该回路所限定面积的总电流, 如表 1.1 中的第二式所示。

类似于电场中电压  $U$  的定义, 在磁场中将两点间的磁压  $U_m$  定义为:  $U_m = \int_{x_1}^{x_2} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$ , 如果两点间的磁场是均匀场, 沿两点间长度  $l$  方向磁场强度向量  $\mathbf{H}$  的值均为  $H$ , 则  $U_m = H \cdot l$ 。电力电子装置中电感和变压器的磁路通常由一种或几种导磁介质(铁心和气隙)组成, 其磁场是均匀或分段均匀的, 所以有:  $\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \sum U_m$ 。

设磁性器件某个绕组的匝数为  $n$ , 流过的电流为  $i$ , 则该绕组电流所产生的磁势为:  $F = n \cdot i$ , 磁势  $F$  也称为磁动势或磁通势。磁性器件一般有一个或多个绕组,  $\oint_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \sum F$ , 故在磁路中安培环路定律可以表示为

$$\sum F = \sum U_m \quad (1.4)$$

即在磁路中任一闭合路径上,磁势  $F$  的总和等于磁压降  $U_m$  的总和。例如,对于如图 1.3 所示的磁性器件,有:  $n_1 i_1 + n_2 i_2 - n_3 i_3 = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4$ 。

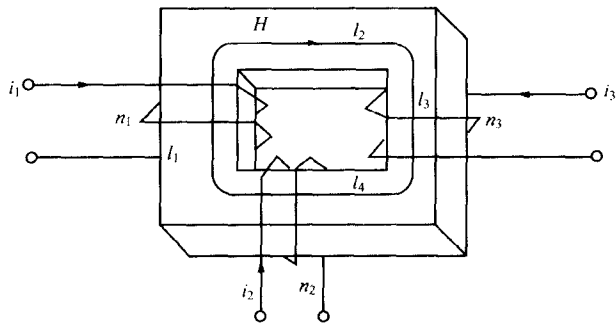


图 1.3 安培环路定律例图

### 3. 磁通连续性原理

磁通连续性原理的表述为:在磁场中,磁感应强度线(也叫磁通密度线)既无始端也无终端,它们都是连续的,如表 1.1 中的第三式所示。该式说明:由任何闭合面穿出的净磁通等于零,即进去的磁通等于出来的磁通。

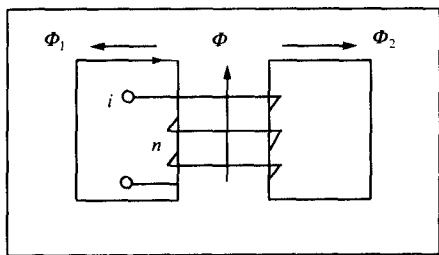


图 1.4 磁通连续性原理例图

在磁路中,表 1.1 中的第三式可以表示为

$$\sum \Phi_{in} = \sum \Phi_{out} \quad (1.5)$$

例如,根据磁通连续性原理,对于图 1.4

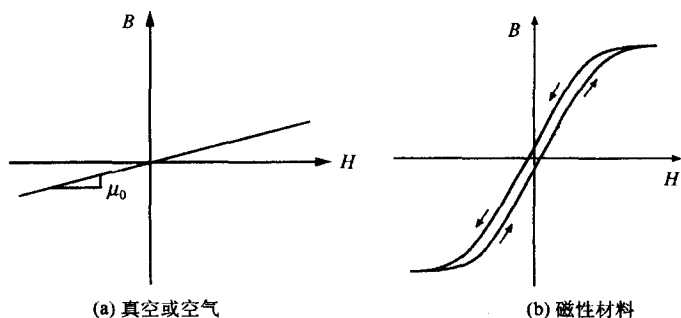
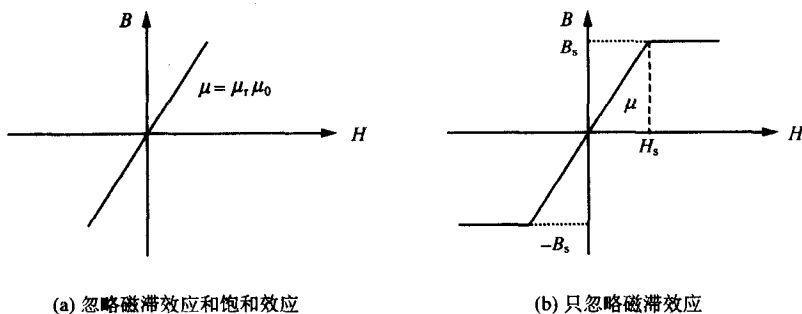
所示的铁心线圈磁路,  $\Phi = \Phi_1 + \Phi_2$ 。

### 4. 磁通密度 $B$ 和磁场强度 $H$ 的关系

在各向同性的导磁介质中,磁感应强度向量  $B$  与磁场强度向量  $H$  的关系如式 (1.1a) 所示。如果导磁介质是真空或空气,则  $\mu_r = 1, \mu = \mu_0$ ,  $B$  和  $H$  的关系如图 1.5(a) 所示。如果导磁介质是铁磁材料(简称磁性材料),则  $\mu = \mu_r \mu_0$ ,  $\mu_r$  的值随  $B$  和  $H$  变化,  $B$  和  $H$  的关系如图 1.5(b) 所示,磁性材料的  $B-H$  特性曲线具有磁滞和饱和现象:在不饱和段,磁导率  $\mu$  的值视具体材料而定;在饱和段,  $\mu \approx \mu_0$ 。

有时为了分析的方便,将图 1.5(b)所示的  $B-H$  特性曲线近似为线性或分段线性,如图 1.6 所示。图 1.6(a)中的线性模型忽略了磁滞效应及饱和效应,  $B-H$  特性仍可用式(1.1a)表示,磁导率  $\mu$  为常数;图 1.6(b)中的分段线性模型考虑了饱和效应但忽略了磁滞效应,设饱和磁密为  $B_s$ ,饱和转折点处的磁场强度为  $H_s$ ,则当  $|H| \leq H_s$  时,磁导率  $\mu$  仍是常数,  $B-H$  特性仍满足式(1.1a),当  $|H| \geq H_s$  时,磁性材料饱和,磁导率很小,约等于  $\mu_0$ ,  $|B| \approx B_s$ 。所以,考虑饱和效应但忽略磁滞效应的  $B-H$  特性可以表示为

$$B = \begin{cases} B_s & \text{当 } H \geq H_s \\ \mu H & \text{当 } |H| \leq H_s \\ -B_s & \text{当 } H \leq -H_s \end{cases} \quad (1.6)$$

图 1.5 导磁介质的  $B-H$  特性曲线图 1.6 磁性材料近似的  $B-H$  特性曲线

### 5. 磁路分析中麦克斯韦方程组的归纳总结

综上所述,在磁性器件的分析中,可以将麦克斯韦方程组表示为如图 1.7 所示的形式。电磁感应定律把绕组电压  $u$  与磁通  $\Phi$  和磁通密度  $B$  联系了起来;安培环路定律把绕组电流  $i$  和磁势  $F$  与磁场强度  $H$  和磁压降  $U_m$  联系了起来;磁通密度  $B$  和磁场强度  $H$  的关系与磁性材料的特性有关。

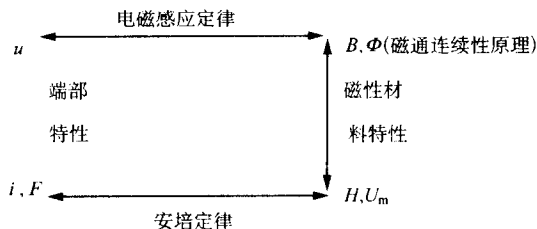


图 1.7 磁性器件分析中麦克斯韦方程组的归纳总结

例如,对于如图 1.8 所示的铁心线圈,若忽略线圈电阻,则根据电磁感应定律,有

$$u = n \frac{d\Phi}{dt} = nA_c \frac{dB}{dt}$$

根据安培环路定律,有:  $H \cdot l_c = n \cdot i$ 。

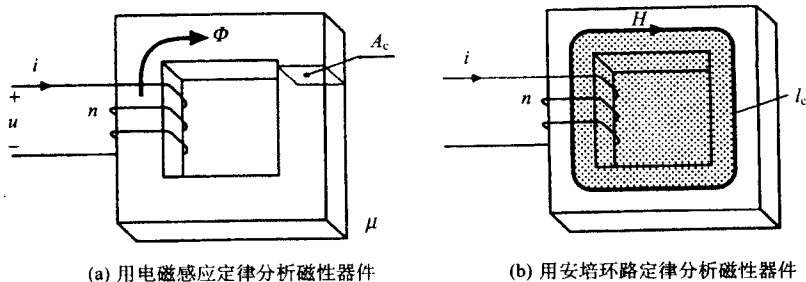


图 1.8 根据麦克斯韦方程分析磁性器件

根据式(1.6)可知,在考虑饱和效应但忽略磁滞效应时,  $H_s = B_s/\mu$ , 其中  $\mu$  为图 1.6(b)中  $B-H$  曲线不饱和段的磁导率,此时电感器铁心的  $B-H$  特性可表示为



$$B = \begin{cases} B_s & \text{当 } H \geq B_s/\mu \\ \mu H & \text{当 } |H| \leq B_s/\mu \\ -B_s & \text{当 } H \leq -B_s/\mu \end{cases} \quad (1.7)$$

所以在饱和转折点处电流  $i$  的幅值  $I_s$  为

$$I_s = \frac{B_s \cdot l_c}{\mu \cdot n} \quad (1.8)$$

当  $|i| \leq I_s$  时,  $B = \mu H$ , 得

$$u = \mu \cdot n \cdot A_c \frac{dH}{dt} = \mu \frac{n^2 A_c}{l_c} \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (1.9)$$

电感

$$L = \mu \frac{n^2 A_c}{l_c} \quad (1.10)$$

当  $|i| > I_s$  时, 磁通密度  $B = B_s$ , 铁心饱和, 铁心的磁导率  $\mu$  趋近于  $\mu_0$ , 铁心线圈的电感  $L$  趋近于 0, 此时, 如果忽略导线电阻, 就相当于线圈短路。

由此可见, 只有当铁心线圈的电流幅值小于  $I_s$  时, 它才具有一定的电感量而表现为一个电感器; 而当通过线圈的电流幅值大于  $I_s$  时, 铁心会饱和, 铁心线圈的电感和感抗会大大减小, 不能起到通常电感器的滤波作用。

## 6. 电磁量的单位

在本书中电磁量的单位一般采用国际单位制, 个别地方采用厘米克秒单位制, 各电磁量的单位及转换关系如表 1.2 所示。

表 1.2 电磁量的单位

| 电磁量          | 国际单位制                     | 厘米克秒制         | 转换关系                                                      |
|--------------|---------------------------|---------------|-----------------------------------------------------------|
|              | $B = \mu_0 \cdot \mu_r H$ | $B = \mu_r H$ |                                                           |
| $B$          | 特斯拉(T)                    | 高斯(G)         | $1\text{T} = 1.0 \times 10^4 \text{G}$                    |
| $H$          | 安培/米(A/m)                 | 奥斯特(Oe)       | $1\text{A/m} = 4\pi \times 10^{-3} \text{Oe}$             |
| $\Phi$       | 韦伯(Wb)                    | 麦克斯韦(Mx)      | $1\text{Wb} = 10^8 \text{Mx}, 1\text{T} = 1\text{Wb/m}^2$ |
| $\mu_0, \mu$ | 亨/米(H/m)                  | 高斯/奥斯特(G/Oe)  | $1\text{H/m} = 1/(4\pi \times 10^{-7}) \text{G/Oe}$       |
| $L$          | 亨(H)                      | 毫亨(mH)        | $1\text{H} = 10^3 \text{mH}$                              |
| 磁势 $F$       | 安培(A)                     | 毫安(mA)        | $1\text{A} = 10^3 \text{mA}$                              |
| 磁压 $U_m$     | 安培(A)                     | 毫安(mA)        | $1\text{A} = 10^3 \text{mA}$                              |