

信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

WILEY

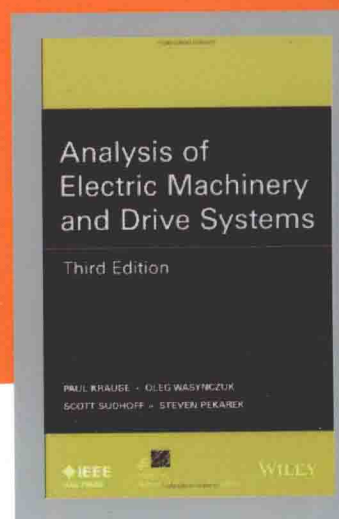
Analysis of Electric Machinery  
and Drive Systems 3rd Edition

# 电机原理及驱动分析 (第3版)

Paul Krause  
Oleg Wasynczuk 著  
Scott Sudhoff  
Steven Pekarek

永奎 边春元 译

清华大学出版社



信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列

**Analysis of Electric Machinery  
and Drive Systems 3rd Edition**

**电机原理及驱动分析  
(第3版)**

Paul Krause    Oleg Wasynczuk    著  
Scott Sudhoff    Steven Pekarek

满永奎 边春元 译

清华大学出版社  
北京

**Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 3rd Edition**

Paul Krause, Oleg Wasynczuk, Scott Sudhoff, Steven Pekarek

ISBN: 9781118024294

Copyright © 2013 by John Wiley & Sons, Limited. All rights reserved.

Copyright © 2015 by John Wiley & Sons, Limited and Tsinghua University Press. All rights reserved.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Tsinghua University Press Limited and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

本书封底贴有 John Wiley & Sons 防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2013-7447

**图书在版编目(CIP)数据**

电机原理及驱动分析:第3版/(美)克劳斯(Krause,P.)等著;满永奎,边春元译. —北京:清华大学出版社,2015

(信息技术和电气工程学科国际知名教材中译本系列)

书名原文: Analysis of electric machinery and drive systems,3rd Edition

ISBN 978-7-302-39774-8

I. ①电… II. ①克… ②满… ③边… ④边… ①电机学—教材 ②电力传动—教材 IV. ①TM3 ②TM921

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 011501 号



责任编辑:盛东亮

封面设计:常雪影

责任校对:梁毅

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:29.75

字 数:743 千字

版 次:2015 年 8 月第 1 版

印 次:2015 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:69.00 元

产品编号:054593-01

# 译者序

IEEE 编辑委员会组织了多个丛书系列,其中电力工程系列图书已经出版了 61 种,本书是其中之一。自从 1994 年第 1 版出版以来,《电机原理及驱动分析》受到了该领域广大学者的普遍好评。本书是 2013 年出版的第 3 版,它的内容最大限度地综合了当前最新的研究与发展成果,成为当前最知名的有关电机控制技术的参考图书之一。

本书的作者都是电机与电机控制领域的资深专家,详细情况可以参考本书封底的作者简介。

本书主要由满永奎、边春元、杨珺、杨东升翻译。此外,蔡看、康森森、王武学、董宝磊、刘红旗、黄超杰、刘洋也为本书的翻译出版做了大量的工作。

在本书的翻译过程中,得到了清华大学出版社盛东亮编辑的大力支持,在此表示诚挚的谢意。

本书可以作为普通高等学校电气工程专业和自动化专业本科生及研究生的专业基础课程教材,也可以作为从事电气工程及自动化行业科研工作的广大科研技术人员的参考用书。

在本书的翻译过程中,我们力求忠实于原著,但由于我们专业技术水平和翻译水平有限,书中难免有各种瑕疵和疏漏之处,敬请读者批评指正。联系邮箱 manyongkui@neu.edu.cn。

译者

2015 年 6 月于沈阳

# 前 言

熟悉本书第1版和第2版的读者会发现,第3版扩展和修订了大量内容,以满足电机、电气传动和电力行业读者的需要。

与第1版和第2版一样,参考坐标系理论仍然是本书的核心。然而,新材料的引进使电机设计上了一个新的台阶。第3版的变化如下:

在第1章中,推导电磁力(转矩)方程不再像之前的方法那样受大量复杂求和的困扰,这种简单的方法是通过第二能量平衡关系的辨识来实现的。另外,当三相电流和磁链之和为零时,基于参考坐标系理论的变换还是成立的——当有三次谐波存在时并非如此。对于不容易得到中性点,而仅仅知道线电压的情况下,这种变换是有帮助的,也是很常见的。

第2章使用了绕组函数法来建立旋转气隙磁动势和电机电感模型,并讨论了端部绕组的影响;第15章介绍了电机设计。这两章全新的变化,以及对电机分析的参考坐标系理论,在其他同类图书中是没有的。

第6章介绍了使用派克(Park)方法导出转矩关系,并同时使用参考坐标系理论,这是一个有趣的结合。

第7章给出了运算阻抗的计算,这部分内容是通过电机测量数据来确定电机的参数,这是一种基本方法。

第8章介绍了另一个重要的变化——推导了标准的线性和降阶电机方程,增加了一节用以介绍电压源(voltage behind reactance)的分析方法。这种新的电机方程的方法在电力电子的电机分析和建模中非常实用。因此,这种方法在电力和电气传动行业变成了一种非常有用的工具。

在第1版和第2版中,同步电机的分析是假设正向电流从电机流出,这方便了电力系统工程师,但是却给电气传动工程师带来了困难。本版在同步电机的章节中做了修改,以同时满足电气传动工程师和电力系统工程师的需求。

我们四位作者的职业生涯主要在于研究电机和电机驱动,我们不仅仅是合作者,也是同事和好朋友。在本书的撰写过程中我们紧密合作,无法根据贡献来对封面署名顺序进行排列,因此本书署名顺序仅仅是按年龄排序。

Paul Krause, Oleg Wasynczuk,  
Scott Sudhoff, Steven Pekarek  
2013 年

# 目 录

|                    |    |
|--------------------|----|
| 第1章 机电能量转换理论       | 1  |
| 1.1 引言             | 1  |
| 1.2 磁耦合电路          | 1  |
| 线性磁路系统             | 2  |
| 非线性磁路系统            | 5  |
| 1.3 机电能量转换         | 8  |
| 能量关系               | 8  |
| 耦合场中的能量            | 11 |
| 能量转换的图形解释          | 15 |
| 电磁力和静电力            | 17 |
| 机电系统的稳态和动态特性       | 19 |
| 1.4 基本的交流电机        | 24 |
| 参考文献               | 31 |
| 习题                 | 31 |
| 第2章 交流电机的分布绕组      | 38 |
| 2.1 引言             | 38 |
| 2.2 分布绕组描述         | 38 |
| 分布绕组的离散描述方法        | 40 |
| 分布绕组的连续描述方法        | 41 |
| 导体分布的对称条件          | 41 |
| 分布绕组离散描述和连续描述之间的转换 | 42 |
| 端部导体               | 42 |
| 一般的绕组设计            | 43 |
| 2.3 绕组函数           | 45 |
| 2.4 气隙磁动势          | 48 |
| 2.5 旋转 MMF         | 50 |
| 2.6 磁链和电感          | 51 |
| 2.7 电阻             | 53 |
| 2.8 分布绕组的电压和磁链方程   | 54 |
| 定子电压方程             | 54 |
| 同步电机               | 54 |
| 异步电机               | 56 |
| 参考文献               | 58 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 习题 .....                    | 58         |
| <b>第3章 参考坐标系理论 .....</b>    | <b>60</b>  |
| 3.1 引言 .....                | 60         |
| 3.2 背景 .....                | 60         |
| 3.3 变换方程: 变量的变换 .....       | 61         |
| 3.4 静态电路变量向任意参考坐标系的变换 ..... | 62         |
| 阻性元件 .....                  | 62         |
| 感性元件 .....                  | 63         |
| 容性元件 .....                  | 65         |
| 3.5 通常使用的参考坐标系 .....        | 67         |
| 3.6 对称系统的变换 .....           | 68         |
| 3.7 对称稳态相量关系 .....          | 68         |
| 3.8 对称稳态电压方程 .....          | 70         |
| 3.9 从几个参考坐标系观察的变量 .....     | 72         |
| 3.10 参考坐标系之间的变换 .....       | 76         |
| 3.11 特殊变换 .....             | 77         |
| 3.12 空间向量表示 .....           | 78         |
| 参考文献 .....                  | 80         |
| 习题 .....                    | 80         |
| <b>第4章 永磁交流电机 .....</b>     | <b>85</b>  |
| 4.1 引言 .....                | 85         |
| 4.2 电机的电压和转矩方程 .....        | 85         |
| 4.3 在转子参考坐标系的电压和转矩方程式 ..... | 88         |
| 4.4 稳态运行分析 .....            | 89         |
| 4.5 无刷直流电机 .....            | 90         |
| 4.6 永磁电机的电压相移 .....         | 96         |
| 4.7 定子电流的控制 .....           | 98         |
| 参考文献 .....                  | 99         |
| 习题 .....                    | 99         |
| <b>第5章 同步电机 .....</b>       | <b>101</b> |
| 5.1 引言 .....                | 101        |
| 5.2 以电机变量表示的电压方程 .....      | 101        |
| 5.3 以电机变量表示的电磁转矩方程式 .....   | 105        |
| 5.4 任意旋转坐标系中的定子电压方程式 .....  | 106        |
| 5.5 转子坐标系中的电压方程式 .....      | 107        |
| 5.6 变量替换后的电磁转矩方程 .....      | 111        |

|                                                    |            |
|----------------------------------------------------|------------|
| 5.7 转子角度位置 .....                                   | 112        |
| 5.8 标么值 .....                                      | 113        |
| 5.9 稳态运行分析 .....                                   | 114        |
| 5.10 定子电流流出电机为正: 同步发电机运行 .....                     | 121        |
| 输入转矩突变时的动态特性 .....                                 | 125        |
| 电机端部三相故障时的动态运行特性 .....                             | 129        |
| 近似的暂态转矩-转子角度特性 .....                               | 132        |
| 在输入转矩突变时的实际的和近似的暂态转矩-角度特性比较:<br>初次摆动暂态稳定性极限值 ..... | 134        |
| 端部发生三相短路故障时, 实际的和近似的暂态转矩-角度特性比较:<br>临界恢复时间 .....   | 136        |
| 等面积准则 .....                                        | 139        |
| 5.11 计算机仿真 .....                                   | 145        |
| 在转子参考坐标系中进行仿真 .....                                | 145        |
| 在任意参考坐标系中定子电压方程仿真 .....                            | 147        |
| 饱和情况的仿真 .....                                      | 148        |
| 对称条件下的仿真 .....                                     | 151        |
| 定子不对称状态时的仿真 .....                                  | 151        |
| 参考文献 .....                                         | 152        |
| 习题 .....                                           | 152        |
| <b>第6章 异步电机</b> .....                              | <b>156</b> |
| 6.1 引言 .....                                       | 156        |
| 6.2 用电机变量表示电压方程 .....                              | 156        |
| 6.3 用电机变量表示转矩方程 .....                              | 159        |
| 6.4 转子电路的变换公式 .....                                | 160        |
| 6.5 用任意参考坐标系变量表示电压方程 .....                         | 162        |
| 6.6 用任意参考坐标系中的变量表示转矩方程 .....                       | 166        |
| 6.7 常用的参考坐标系 .....                                 | 168        |
| 6.8 标么制 .....                                      | 168        |
| 6.9 稳态运行的分析 .....                                  | 170        |
| 6.10 自由(空载)加速特性 .....                              | 175        |
| 6.11 从不同参考坐标系下观察自由加速特性 .....                       | 181        |
| 6.12 负载转矩突变时的动态性能 .....                            | 187        |
| 6.13 电机端子出现三相短路时的动态性能 .....                        | 189        |
| 6.14 在任意参考坐标系进行计算机仿真 .....                         | 190        |
| 参考文献 .....                                         | 193        |
| 习题 .....                                           | 193        |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第7章 在时域表示的电机方程式             | 197 |
| 7.1 引言                      | 197 |
| 7.2 派克方程式的微分算子形式            | 197 |
| 7.3 同步电机四个转子绕组的运算阻抗和 $G(p)$ | 198 |
| 7.4 标准同步电机阻抗                | 200 |
| 7.5 同步电机标准时间常数              | 202 |
| 7.6 同步电机时间常数的推导             | 202 |
| 7.7 从短路特性求取参数               | 205 |
| 7.8 从频率响应特性求取参数             | 210 |
| 参考文献                        | 214 |
| 习题                          | 215 |
| 第8章 电机方程的其他表示形式             | 217 |
| 8.1 简介                      | 217 |
| 8.2 非线性化的电机模型               | 218 |
| 异步电机                        | 218 |
| 同步电机                        | 218 |
| 8.3 电机方程的线性化                | 219 |
| 异步电机                        | 220 |
| 同步电机                        | 221 |
| 8.4 小信号稳定性分析:特征值            | 224 |
| 8.5 典型的异步电机的特征值             | 224 |
| 8.6 典型的同步电机的特征值             | 227 |
| 8.7 忽略电气瞬变的定子电压方程           | 227 |
| 异步电机                        | 229 |
| 同步电机                        | 230 |
| 8.8 忽略定子电气瞬变情况下,异步电机运行特性的预测 | 231 |
| 自由加速特性分析                    | 231 |
| 负载转矩的变化                     | 232 |
| 电机端子三相短路故障                  | 233 |
| 8.9 忽略定子电气暂态,预测同步电机运行特性     | 234 |
| 输入转矩的变化                     | 234 |
| 电机端子三相短路故障                  | 234 |
| 8.10 电压源模型                  | 236 |
| 8.11 降阶的电压源模型               | 242 |
| 参考文献                        | 243 |
| 习题                          | 244 |

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| 第 9 章 不平衡条件运行及单相感应电机      | 245 |
| 9.1 引言                    | 245 |
| 9.2 对称分量理论                | 245 |
| 9.3 感应电机对称分量分析            | 246 |
| 9.4 感应电机的定子不平衡条件: 参考坐标系分析 | 247 |
| 参考坐标系中的不平衡系统变量            | 247 |
| 相量关系                      | 249 |
| 9.5 感应电机典型定子不平衡条件         | 252 |
| 输入电压不平衡                   | 252 |
| 定子阻抗不平衡                   | 253 |
| 定子一相开路                    | 254 |
| 9.6 感应电机的转子不平衡条件          | 255 |
| 任意参考坐标系内不平衡系统变量           | 256 |
| 相量关系                      | 257 |
| 9.7 转子电阻不平衡               | 258 |
| 9.8 单相感应电机                | 261 |
| 任意参考坐标系内的电压方程             | 262 |
| 任意参考坐标系内不平衡的电机变量          | 263 |
| 相量关系                      | 264 |
| 不平衡定子阻抗                   | 264 |
| 定子相开路                     | 265 |
| 单相感应电机的运行特性               | 266 |
| 9.9 同步电机的异步运行以及不平衡条件运行    | 268 |
| 电机启动                      | 269 |
| 极滑                        | 270 |
| 相线-中线短路                   | 272 |
| 相线-相线短路                   | 272 |
| 相线-相线-中线短路                | 273 |
| 参考文献                      | 274 |
| 习题                        | 274 |
| 第 10 章 直流电机及驱动            | 276 |
| 10.1 引言                   | 276 |
| 10.2 直流电机基础               | 276 |
| 10.3 电压和转矩方程式             | 281 |
| 10.4 基本的直流电机种类            | 282 |
| 他励直流电机                    | 282 |
| 并励直流电机                    | 283 |
| 串励直流电机                    | 284 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 复励直流电机                   | 286 |
| 10.5 时域框图和状态方程           | 288 |
| 并励直流电机                   | 289 |
| 永磁直流电机                   | 290 |
| 10.6 直流驱动系统的固态变流器        | 291 |
| 单相交/直整流器                 | 291 |
| 三相交/直变换器                 | 293 |
| 直/直斩波器                   | 293 |
| 10.7 一象限直/直变流器驱动         | 294 |
| 一象限直/直斩波器                | 294 |
| 连续电流运行                   | 295 |
| 不连续电流运行                  | 298 |
| 平均值分析                    | 300 |
| 运行特性                     | 303 |
| 10.8 两象限直/直变流器驱动         | 307 |
| 10.9 四象限直/直变流器驱动         | 309 |
| 10.10 具有电压控制型直/直变流器的电机控制 | 311 |
| 速度控制:电压控制型直/直变流器         | 311 |
| 速度控制:带电压前馈控制的电压控制直/直变流器  | 312 |
| 10.11 电流控制型直/直变流器的电机控制   | 313 |
| 电流控制四象限直/直变流器            | 313 |
| 速度控制:流控型直/直变流器           | 316 |
| 参考文献                     | 317 |
| 习题                       | 317 |
| <b>第11章 半控桥式转换器</b>      | 319 |
| 11.1 引言                  | 319 |
| 11.2 单相负载换相转换器           | 319 |
| 没有换相电感或触发延迟的运行情况         | 319 |
| 有换相电感无触发延迟时的运行情况         | 321 |
| 没有换相电感而有触发延迟时的运行情况       | 321 |
| 有换相电感和有触发延迟时的运行情况        | 322 |
| 运行模式                     | 324 |
| 11.3 三相负载换相转换器           | 327 |
| 工作模式                     | 328 |
| 分析和平均值模型                 | 330 |
| 11.4 结论与扩展               | 336 |
| 参考文献                     | 337 |
| 习题                       | 337 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第 12 章 三相全控桥式逆变器 .....          | 338 |
| 12.1 简介 .....                   | 338 |
| 12.2 三相桥式逆变器 .....              | 338 |
| 12.3 六拍运行 .....                 | 342 |
| 12.4 六拍调制 .....                 | 347 |
| 12.5 正弦-三角波调制方法 .....           | 350 |
| 12.6 扩展的正弦-三角波调制 .....          | 354 |
| 12.7 空间矢量调制 .....               | 355 |
| 12.8 滞环调制 .....                 | 358 |
| 12.9 误差调制 .....                 | 360 |
| 12.10 开环电压和电流调节 .....           | 361 |
| 12.11 闭环电压和电流调节 .....           | 362 |
| 参考文献 .....                      | 365 |
| 习题 .....                        | 366 |
| 第 13 章 异步电机的控制 .....            | 368 |
| 13.1 引言 .....                   | 368 |
| 13.2 压频比控制 .....                | 368 |
| 13.3 恒滑差频率的电流控制方式 .....         | 373 |
| 13.4 磁场定向控制 .....               | 378 |
| 13.5 直接磁场定向控制 .....             | 381 |
| 13.6 具有鲁棒性的直接转矩控制系统 .....       | 382 |
| 13.7 间接转子磁场定向控制 .....           | 385 |
| 13.8 直接转矩控制 .....               | 388 |
| 13.9 滑差的能量回馈控制 .....            | 391 |
| 13.10 结论 .....                  | 393 |
| 参考文献 .....                      | 394 |
| 习题 .....                        | 394 |
| 第 14 章 永磁交流电机的驱动 .....          | 396 |
| 14.1 引言 .....                   | 396 |
| 14.2 电压源型逆变器驱动系统 .....          | 396 |
| 14.3 电压源型逆变器等效的理想化电源 .....      | 397 |
| 14.4 电压源型逆变驱动系统的平均值分析 .....     | 403 |
| 14.5 电压源型逆变驱动系统的稳态性能 .....      | 406 |
| 14.6 电压源型逆变驱动系统的暂态和动态性能 .....   | 408 |
| 14.7 案例研究：基于电压源逆变器的速度控制系统 ..... | 412 |
| 14.8 电流调节型逆变器驱动系统 .....         | 415 |
| 14.9 电流调节型逆变驱动系统的电压限制 .....     | 418 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 14.10 电流指令的合成 .....                | 419 |
| 14.11 电流调节型逆变驱动系统的平均值模型 .....      | 422 |
| 14.12 案例研究:基于电流调节型逆变器的速度控制系统 ..... | 423 |
| 参考文献 .....                         | 425 |
| 习题 .....                           | 425 |
| <b>第15章 电机设计介绍</b> .....           | 427 |
| 15.1 引言 .....                      | 427 |
| 15.2 电机的结构 .....                   | 428 |
| 15.3 定子绕组 .....                    | 432 |
| 15.4 材料参数 .....                    | 434 |
| 15.5 定子电流和控制原理 .....               | 435 |
| 15.6 径向磁场分析 .....                  | 436 |
| 定子磁动势 .....                        | 437 |
| 径向磁场变化 .....                       | 437 |
| 气隙磁动势降落 .....                      | 438 |
| 永磁体磁动势 .....                       | 438 |
| 径向磁通密度的求解 .....                    | 439 |
| 15.7 集总参数 .....                    | 439 |
| 15.8 铁磁材料中磁场分析 .....               | 440 |
| 15.9 设计问题的规划 .....                 | 444 |
| 空间设计 .....                         | 444 |
| 设计指标 .....                         | 444 |
| 设计约束 .....                         | 445 |
| 设计适用度 .....                        | 446 |
| 15.10 实例 .....                     | 447 |
| 15.11 扩展 .....                     | 452 |
| 参考文献 .....                         | 453 |
| 习题 .....                           | 453 |
| <b>附录A 三角关系、常量、转换因子和缩写</b> .....   | 455 |
| A.1 基本的三角关系 .....                  | 455 |
| A.2 三相三角关系 .....                   | 455 |
| A.3 常量和转换因子 .....                  | 456 |
| A.4 缩写 .....                       | 456 |
| <b>附录B 卡特系数</b> .....              | 457 |
| <b>附录C 漏感</b> .....                | 459 |
| 参考文献 .....                         | 462 |

# 第1章 机电能量转换理论

## 1.1 引言

利用机电能量转换的理论,能够建立电机以电变量—主要是电流—和机械系统位移为变量的转矩表达式。基于这个理论,本章将介绍具有磁耦合电路的等效电路表示方法。在第2章中,我们会发现电机的电感是转子位置的函数,这增加了系统的复杂性。在第3章中,通过消除依赖于转子位置的电感,减少分析电机的复杂性,提供了更直接的方法来建立电机的转矩表达式。

## 1.2 磁耦合电路

耦合电路是变压器和电机运行的核心,在变压器中,为了改变电压和电流,采用静止的磁路耦合;在电机中,要进行机电能量转换,要使用具有相对运动的磁路耦合。由于磁耦合电路在电力传输和电力转换中起着极其重要的作用,因此建立起便于分析的特性方程就显得极其重要。我们从图1.2-1的静止磁耦合电路着手分析,两个线圈分别是 $N_1$ 和 $N_2$ 匝,它们缠绕在一个共同的铁磁材料铁心上。铁磁材料的磁导率远大于空气的磁导率,真空中的磁导率是 $\mu_0$ ,等于 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。铁磁材料的磁导率可以表示为 $\mu = \mu_r \mu_0$ ,其中 $\mu_r$ 是相对磁导率,对于变压器的铁心来说,相对磁导率在2000~4000的范围。

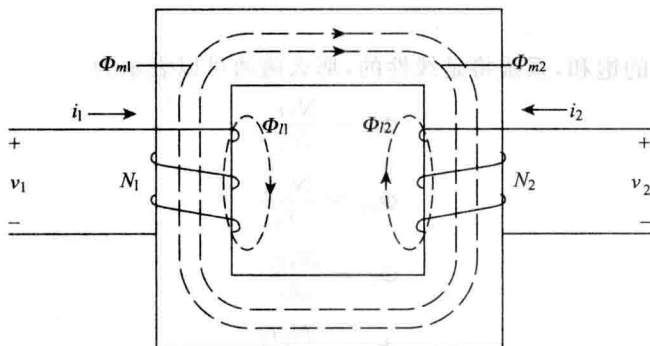


图 1.2-1 磁耦合电路

一般来说,每一个线圈产生的磁通分两部分,一部分是漏磁通,用下标 $l$ 表示;另一部分是激磁磁通,用下标 $m$ 表示。每个分量的正方向由右手螺旋法则确定。在变压器的分析中, $i_2$ 的正方向通常选取流出线圈2的方向,用同名端标注。

每个线圈的磁通可以表示为

$$\Phi_1 = \Phi_{l1} + \Phi_{m1} + \Phi_{m2} \quad (1.2-1)$$

$$\Phi_2 = \Phi_{l2} + \Phi_{m2} + \Phi_{m1} \quad (1.2-2)$$

漏磁通  $\Phi_{l1}$  由线圈 1 的电流产生,它仅仅和线圈 1 的匝数交链。同样,漏磁通  $\Phi_{l2}$  由线圈 2 的电流产生,它仅仅和线圈 2 的匝数交链。激磁磁通  $\Phi_{m1}$  由线圈 1 的电流产生,它交链线圈 1 和线圈 2 的匝数。类似地,激磁磁通  $\Phi_{m2}$  由线圈 2 的电流产生,它交链线圈 1 和线圈 2 的匝数。根据图 1.2-1 规定的电流流动的正方向,由线圈 1 中正电流产生的激磁磁通和另一个线圈中的正电流产生的激磁磁通将互相增强。换句话说,如果两个线圈中的电流是相同方向,那么它们产生的磁通也是相同方向,总的磁通是每个分磁通的和。如果电流是相反的方向,磁通也是相反的方向,在这种情况下,一个线圈叫增磁,另一个线圈叫去磁。

需要指出,这是实际磁性系统的理想化情况。在实际上,所有的漏磁通不可能交链本身线圈的所有的匝数。同样,一个线圈的所有的磁通也可能不交链另一个线圈的所有的匝数。考虑到磁性系统的实际情况,匝数被认为是等效匝数,而不是其实际匝数。这样的事实不会引起我们担心,因为与磁性耦合的电感基本是通过实验得到的。

电压方程可以表示成矩阵形式如下

$$\mathbf{v} = \mathbf{r}\mathbf{i} + \frac{d\boldsymbol{\lambda}}{dt} \quad (1.2-3)$$

其中,  $\mathbf{r} = \text{diag}[r_1 + r_2]$  是对角矩阵,和

$$(\mathbf{f})^T = [f_1 \ f_2] \quad (1.2-4)$$

其中,  $f$  代表电压、电流、或者磁链;电阻  $r_1$  和  $r_2$ , 磁链  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别对应线圈 1 和线圈 2 的物理量。由于假设  $\Phi_1$  和线圈 1 的等效匝数交链,假设  $\Phi_2$  和线圈 2 的等效匝数交链,磁链表达式可以写为

$$\lambda_1 = N_1 \Phi_1 \quad (1.2-5)$$

$$\lambda_2 = N_2 \Phi_2 \quad (1.2-6)$$

其中,  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  分别由式(1.2-1)和式(1.2-2)给出。

## 线性磁路系统

如果忽略磁路的饱和,系统将是线性的,那么磁通可以表示为

$$\Phi_{l1} = \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_{l1}} \quad (1.2-7)$$

$$\Phi_{m1} = \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_m} \quad (1.2-8)$$

$$\Phi_{l2} = \frac{N_2 i_2}{\mathcal{R}_{l2}} \quad (1.2-9)$$

$$\Phi_{m2} = \frac{N_2 i_2}{\mathcal{R}_m} \quad (1.2-10)$$

其中,  $\mathcal{R}_{l1}$  和  $\mathcal{R}_{l2}$  是漏磁通路的磁阻,  $\mathcal{R}_m$  是激磁通路的磁阻,匝数  $N$  和电流  $i$  的乘积(安匝数)就是安培定律中的磁动势(MMF)。漏磁通路的磁阻是很难表达和测量的,和漏磁有关的磁阻可以通过计算得到,也可以通过设计时的近似分析得到。图 1.2-1 的铁心的激磁通路磁阻可以通过如下已知的关系式足够精确地计算

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (1.2-11)$$

其中,  $l$  是平均的或者等效的磁路长度,  $A$  是截面面积,  $\mu$  是磁导率。

将式(1.2-7)~式(1.2-10)代入式(1.2-2)得

$$\Phi_1 = \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_{l1}} + \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_m} + \frac{N_2 i_2}{\mathcal{R}_m} \quad (1.2-12)$$

$$\Phi_2 = \frac{N_2 i_2}{\mathcal{R}_{l2}} + \frac{N_2 i_2}{\mathcal{R}_m} + \frac{N_1 i_1}{\mathcal{R}_m} \quad (1.2-13)$$

将式(1.2-12)和式(1.2-13)代入式(1.2-5)和式(1.2-6)得

$$\lambda_1 = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{l1}} i_1 + \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_m} i_1 + \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_m} i_2 \quad (1.2-14)$$

$$\lambda_2 = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{l2}} i_2 + \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_m} i_2 + \frac{N_2 N_1}{\mathcal{R}_m} i_1 \quad (1.2-15)$$

当磁路是线性的时候,磁通一般是用电感和电流表示的。这可以从式(1.2-14)看出:公式右侧的前两项系数仅与线圈1的匝数有关,磁路的磁阻与线圈2无关。类似的解释也可以应用到式(1.2-15)。因此,自感可以定义为

$$L_{11} = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{l1}} + \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_m} = L_{l1} + L_{m1} \quad (1.2-16)$$

$$L_{22} = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{l2}} + \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_m} = L_{l2} + L_{m2} \quad (1.2-17)$$

其中, $L_{l1}$ 和 $L_{l2}$ 是漏感, $L_{m1}$ 和 $L_{m2}$ 分别是线圈1和线圈2的激磁电感。根据式(1.2-16)和式(1.2-17),可以有激磁电感的关系

$$\frac{L_{m2}}{N_2^2} = \frac{L_{m1}}{N_1^2} \quad (1.2-18)$$

互感是被定义为式(1.2-14)和式(1.2-15)中第三项的系数,即

$$L_{12} = \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_m} \quad (1.2-19)$$

$$L_{21} = \frac{N_2 N_1}{\mathcal{R}_m} \quad (1.2-20)$$

很明显, $L_{12} = L_{21}$ 。互感可以和激磁电感建立联系,如

$$L_{12} = \frac{N_2}{N_1} L_{m1} = \frac{N_1}{N_2} L_{m2} \quad (1.2-21)$$

经过如上的分析,磁链可以表示为

$$\lambda = \mathbf{L} \mathbf{i} \quad (1.2-22)$$

其中

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{l1} + L_{m1} & \frac{N_2}{N_1} L_{m1} \\ \frac{N_1}{N_2} L_{m2} & L_{l2} + L_{m2} \end{bmatrix} \quad (1.2-23)$$

尽管具有电感矩阵的电压方程式也可以用来分析,人们也习惯于进行变量的变换后,对两个线圈磁耦合的情况,产生众所周知的T型等值电路。为此,可以将式(1.2-22)的磁链公式表示为

$$\lambda_1 = L_{l1} i_1 + L_{m1} \left( i_1 + \frac{N_2}{N_1} i_2 \right) \quad (1.2-24)$$

$$\lambda_2 = L_{l2} i_2 + L_{m2} \left( \frac{N_1}{N_2} i_1 + i_2 \right) \quad (1.2-25)$$

对上面的式子可以有两种选择,即替代变量 $(N_2/N_1)i_2$ 或者 $(N_1/N_2)i_1$ 。首先我们考虑第一种选择

$$N_1 i'_2 = N_2 i_2 \quad (1.2-26)$$

基于此,我们使用替代变量 $i'_2$ ,当它流经线圈1产生的MMF与 $i_2$ 流经线圈2产生的MMF相等,也就是说将线圈2的电流折算到线圈1。另一方面,如果我们使用第二个选择,那么

$$N_2 i'_1 = N_1 i_1 \quad (1.2-27)$$

这里, $i'_1$ 是替代变量,当它在线圈2中流过时产生的MMF与 $i_1$ 在线圈1中流过产生的MMF相等。

接下来,我们通过将线圈2折算到线圈1侧导出T型等值电路。根据式(1.2-26)有

$$i'_2 = \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad (1.2-28)$$

为了保证使用替代变量后的功率不变,有

$$v'_2 = \frac{N_1}{N_2} v_2 \quad (1.2-29)$$

因此, $v_2 i_2 = v'_2 i'_2$ 。磁链(单位是伏秒)和电压有类似的关系

$$\lambda'_2 = \frac{N_1}{N_2} \lambda_2 \quad (1.2-30)$$

将式(1.2-28)代入式(1.2-24)和式(1.2-25),然后用 $N_1/N_2$ 乘以式(1.2-25)得到 $\lambda'_2$ 。如果进一步用 $\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 L_{m2}$ 代替 $L_{m2}$ ,代入式(1.2-25),则有

$$\lambda_1 = L_{l1} i_1 + L_{m1} (i_1 + i'_2) \quad (1.2-31)$$

$$\lambda'_2 = L'_{l2} i'_2 + L_{m1} (i_1 + i'_2) \quad (1.2-32)$$

其中

$$L'_{l2} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_{l2} \quad (1.2-33)$$

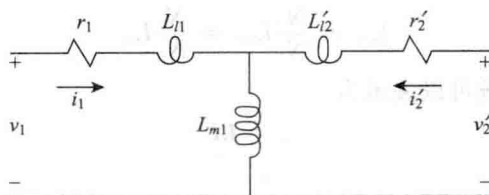


图 1.2-2 折算到线圈1侧的等值电路

则电压方程变为

$$v_1 = r_1 i_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (1.2-34)$$

$$v'_2 = r'_2 i'_2 + \frac{d\lambda'_2}{dt} \quad (1.2-35)$$

其中