

工业和信息化部职业教育指导委员会“十二五”规划教材

高等职业教育自动化类专业规划教材

电机技术与应用

邹大为 马宏赛 主编 郑晓坤 副主编

王成安 主审



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

工业和信息产业职业教育教学指导委员会“十二五”规划教材
高等职业教育自动化类专业规划教材

电机技术与应用

邹大为 马宏骞 主 编
郑晓坤 副主编
王成安 主 审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

“电机技术与应用”是高职电气自动化技术专业的一门专业基础课,主要介绍了当今主流电机的结构、工作原理、额定参数、选用及维修等,重在使学生掌握基本理论知识与基本技能,具备电机的综合应用能力。本书详细介绍了电机技术及其应用,内容主要包括变压器,直流电动机,三相异步电动机,三相异步电动机运行分析,定子绕组,三相异步电动机的安装、维护与故障诊断,单相异步电动机和微特电机。

教材中的图片基本都来自于生产现场,具有较强的实用性和针对性;电机的使用、故障的判定和处理等内容均来自于实践,其中很多内容是作者亲身经历的案例,具有示范性和现场指导意义。

本书突出了工程的实用性,力求降低教材内容的难度,做到通俗易懂,图文并茂,使教材既适合高职学生使用,又可供相关专业工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电机技术与应用/邹大为,马宏骞主编. —北京:电子工业出版社,2012.2

工业和信息化部职业教育指导委员会“十二五”规划教材

高等职业教育自动化类专业规划教材

ISBN 978-7-121-15349-5

I. ①电… II. ①邹… ②马… III. ①电机学—高等职业教育—教材 IV. ①TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 250301 号

策划编辑:王昭松

责任编辑:王昭松 特约编辑:徐 岩

印 刷:北京市李史山胶印厂

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:12.25 字数:313.6 千字

印 次:2012 年 2 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。



《电机技术与应用》作为高职“电气自动化技术”专业核心课的教材，从高职教育的实际出发，注重理论联系实际；力求通俗易懂、深入浅出，突出实际应用环节。本书以常用电机为载体，力求使学生不仅懂得电机的结构和原理，会选用和使用电机，而且还能维修和维护电机。

本教材依据维修电工职业技能鉴定规范，力图反映现场的实际应用及新技术、新产品和新材料。在内容取材及安排上具有以下特点。

(1) 以直流电机、变压器、交流电机及微特电机等作为教学的技术背景，注重每一个产品的分析及应用，强化学生的工程意识，既让学生懂得了专业理论，又培养了学生解决实际问题的能力。

(2) 注重学生应用能力的培养，每章的开篇均提出了知识目标与能力目标。正文中的【课堂讨论】、【工程经验】及【注意事项】大多针对工程中实际遇到的问题，具有很高的工程实用性。

(3) 在教学内容上，以“必需”和“够用”为原则。针对电机技术的发展及实际应用，在内容体系上突出了三相异步电动机的应用，强化了微特电机的控制。全书对高深理论内容，利用图解分析；对大量公式，采用推导从简，注重分析物理意义和应用。

(4) 在实训内容的安排上，以“重基础、快上手、强能力”为原则，以实际电机产品为载体，进行单项技能训练，培养学生实际工作能力。每章的实训是综合性的，是相对完整的工作过程，重在认知和操作。

(5) 本教材所使用的图片都来自于生产现场，实用性和针对性很强。电机的使用、故障的判定和处理等内容均来自于实践，其中很多内容是作者亲身经历的案例，具有很强的示范性和现场指导意义。

本教材既强调基础知识，又力求体现新知识、新技术和新产品，教学内容与国家职业技能鉴定规范相结合。在编写体例上采用新的形式，文字表述简洁，加上大量的实物图片，直观明了。书中注重理论和实践的结合，为学生提供了有实用价值的技能技巧训练，相信会对提高学生的专业技术和开拓学生的视野有所帮助。

各章的参考教学课时分配表

章	主要内容	课时分配	
		理论讲授	实践训练
1	变压器	4	2
2	直流电动机	4	2
3	三相异步电动机	4	3

续表

章	主 要 内 容	课 时 分 配	
		理论讲授	实践训练
4	三相异步电动机定子绕组	4	6
5	三相异步电动机的运行分析	4	4
6	三相异步电动机的安装、维护与故障诊断	2	4
7	单相异步电动机	6	2
8	微特电机	6	3
合 计		34	26

本书由辽宁机电职业技术学院邹大为副教授、马宏骞副教授任主编，郑晓坤老师任副主编。邹大为老师编写了项目1和项目2；马宏骞老师编写了项目3～项目7；郑晓坤老师编写了项目8。全书由邹大为统稿，由辽宁机电职业技术学院王成安教授主审。对书后所列的参考书籍的各位作者，编者表示深深的感谢。

由于编者水平所限，书中不妥之处在所难免，敬请兄弟院校的师生给予批评和指正。请您把对本书的建议告诉我们，以便修订时改进。所有意见和建议请寄往：E-mail: zlx2533420@163.com。

编 者
2012 年 1 月



绪论	1
1. 电机在国民经济中的作用	1
2. 本课程的内容、任务、特点及学习方法	1
第1章 变压器	3
1.1 变压器的结构	4
1.2 变压器的工作原理	6
1.3 变压器的分类	7
1.4 变压器的铭牌数据识别	8
1.5 变压器的运行分析	10
1. 正方向的规定	10
2. 变压器的空载运行	10
3. 变压器的负载运行	12
4. 变压器的阻抗变换	12
1.6 变压器的运行特性	13
1. 变压器负载时二次绕组侧端电压的绕组变化	14
2. 变压器的效率及特性	15
1.7 三相变压器	15
1. 三相变压器的磁路	15
2. 三相变压器的电路	16
3. 三相变压器的并联运行	17
1.8 特种变压器	18
1. 自耦变压器	18
2. 仪用互感器	20
3. 电焊电压器	23
实训1 变压器的认识	24
思考题与习题	26
第2章 直流电动机	28
2.1 直流电动机的结构	29
1. 定子	30
2. 转子	31
2.2 直流电动机的工作原理	33

1. 工作原理分析	33
2. 直流电动机的可逆性	34
2.3 直流电动机的励磁方式	35
2.4 直流电动机的铭牌及主要系列	36
1. 直流电动机的铭牌数据	36
2. 直流电动机出线端子的标志	36
3. 直流电动机的主要系列	37
2.5 直流电动机的磁场	38
1. 直流电动机的空载磁场	38
2. 直流电动机的负载磁场和电枢反应	38
2.6 直流电动机计算的基本方程	40
1. 电动势平衡方程式	40
2. 功率平衡方程式	40
3. 转矩平衡方程式	41
2.7 直流电动机的工作特性	41
1. 并励电动机(他励电动机)的工作特性	42
2. 串励电动机的工作特性	42
2.8 直流电动机的控制	43
1. 直流电动机的启动	43
2. 直流电动机的调速	44
3. 直流电动机的反转	44
4. 直流电动机的制动	45
2.9 直流电动机的常见故障及处理	45
1. 励磁式直流电动机的故障	45
2. 永磁直流电机的特有故障及其原因	48
实训2 直流电动机的拆装	48
思考题与习题	51
第3章 三相异步电动机	53
3.1 三相异步电动机的结构	54
1. 定子	54
2. 转子	55
3. 气隙	57
3.2 三相异步电动机的工作原理	57
1. 旋转磁场	57
2. 三相异步电动机的工作原理	60
3.3 三相异步电动机的铭牌数据识别	61
3.4 三相异步电动机的分类	69
3.5 三相异步电动机主要系列的简介	70
3.6 三相异步电动机的能效及效率分级	72
1. 高效、超高效电机	72

2. 电机效率分级及各级的数值	72
实训3 三相异步电动机的拆装	73
思考题与习题	76
第4章 三相异步电动机定子绕组	78
4.1 电动机绕组的结构形式	79
1. 以定子绕组形成磁极数来区分	79
2. 以定子绕组的形状与嵌装布线来区分	80
4.2 绕组的术语与基本参数	80
4.3 三相单层绕组	83
1. 对交流绕组的基本要求	83
2. 三相单层绕组的特点	83
3. 三相单层绕组展开图的绘制	84
4. 实际工程中的绕组展开图	85
4.4 绕组的故障检查和修理方法	92
1. 绕组接地	92
2. 绕组断路	93
3. 绕组短路	93
4. 绕组接错或嵌反	94
实训4 三相异步电动机绕组的更换	95
思考题与习题	102
第5章 三相异步电动机的运行分析	104
5.1 三相异步电动机的电磁关系	106
1. 转子静止时的电磁关系	106
2. 转子旋转时的电磁关系	108
5.2 三相异步电动机的功率和转矩	110
1. 功率平衡关系	111
2. 转矩平衡关系	112
5.3 三相异步电动机的特性	113
1. 工作特性	113
2. 机械特性	114
5.4 三相异步电动机的运行分析	115
1. 电动机的运行性能	115
2. 三相异步电动机的稳定运行区	117
实训5 三相异步电动机的测试	117
思考题与习题	120
第6章 三相异步电动机的安装、维护与故障诊断	121
6.1 电动机合理运行的条件和内容	122
6.2 三相异步电动机的安装	122
1. 安装前的检查与清理	122
2. 电动机的安装与调整	122

6.3 三相异步电动机的维护	123
1. 电动机运行中的监视	123
2. 电动机的定期维护	124
6.4 三相异步电动机的常见故障及处理	126
1. 启动阶段的故障	126
2. 运行阶段的故障	127
实训6 三相异步电动机的故障排除	137
思考题与习题	140
第7章 单相异步电动机	141
7.1 单相异步电动机的结构	142
1. 定子	142
2. 转子	143
7.2 单相异步电动机的工作原理	143
1. 单相绕组的脉动磁场	143
2. 两相绕组的旋转磁场	144
7.3 单相异步电动机的主要类型及启动方法	145
1. 电容分相式单相异步电动机	145
2. 电阻分相式单相异步电动机	148
3. 单相罩极式电动机	149
7.4 单相异步电动机的铭牌数据识别	151
7.5 单相异步电动机的常见故障及处理	152
实训7 单相异步电动机的控制	156
思考题与习题	158
第8章 微特电机	160
8.1 步进电动机	161
1. 控制系统对步进电动机的要求	161
2. 步进电动机的分类与结构	161
3. 反应式步进电动机	162
4. 永磁式步进电动机	165
5. 步进电动机的驱动器	165
6. 步进电动机的参数、选择与使用	166
7. 步进电动机的应用	167
8. 步进电动机的优缺点	168
8.2 伺服电动机	168
1. 直流伺服电动机	168
2. 交流伺服电动机	170
8.3 直线电动机	172
1. 直线电动机的分类及结构	172
2. 直线电动机的工作原理	174
3. 直线电动机的应用	174

8.4 测速发电机	175
1. 自动控制系统对测速发电机的要求	175
2. 测速发电机的分类	176
3. 交流异步测速发电机	176
4. 直流测速发电机	177
实训 8 步进电动机的控制	178
思考题与习题	181
参考文献	183

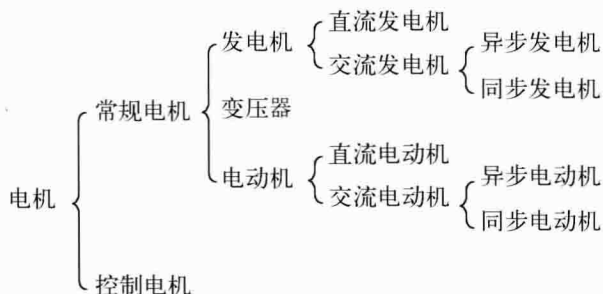
绪 论

1. 电机在国民经济中的作用

从广义上讲,电机是电能的变换装置,包括旋转电机和静止电机。旋转电机是根据电磁感应原理实现电能与机械能之间相互转换的一种能量转换装置;静止电机是根据电磁感应定律和磁势平衡原理实现电压变化的一种电磁装置,也称为变压器。

电机作为机电能量转换的重要装置,是电气传动的基础部件,对国民经济、能源利用、环境保护和人民生活质量的提高都起着十分重要的作用。与内燃机和蒸汽机相比,电机的运行效率要高得多;并且电能比其他能源传输更方便、费用更廉价,此外电能还具有清洁无污染、容易控制等特点,所以在实际生活和工程实践中,电机的应用日益广泛,其耗电量也占据了全部用电量的60%以上,可以说,有电能应用的场合都会有电机的身影。

作为一种电磁机械装置,其种类繁多,如果按其功能来分类,可以分为常规电机和控制电机两大类。



2. 本课程的内容、任务、特点及学习方法

本课程是电气自动化、电气技术、机电一体化等电类专业的一门专业基础课。它既具有很强的专业基础性,又带有很强的专业实践性,学习内容与生产应用紧密联系。在知识目标方面要着重学习基本概念,单个电机的工作原理、结构及相关参数等;在能力目标方面以实际电机为载体,要着重培养电机的选择能力、运行维护能力、设备故障分析处理能力等。正文中提及的【课堂讨论】、【工程经验】及【注意事项】等内容应予以特别重视,对强化学生的工程意识帮助很大。

本课程将“电机原理”、“电力拖动基础”、“控制电机”、“电机应用与维修”等融于一体,使学生对电机有一个全面的了解,既掌握了电机的基本原理,又能对电机应用得

心应手。在内容体系上突出了三相异步电动机的实际应用，特别是关于电机使用、故障判定和处理的内容均来自于实践，具有很强的实用性和针对性。一改以往直流发电机特性和直流电动机特性并重，直流电机与三相异步电动机并重的状况，强化了微特电机的使用及控制。

本课程将“教、学、做”交替教学模式融入到教学中，选取了大量的实物图片和生产案例，具有很强的示范性和现场指导意义。

本课程涉及的前期课程较多，包括高等数学、电工基础、电子技术等，学习时需要复习相关课程并综合运用所学知识。

第1章 变 压 器

变压器是一种静止的电气设备，它利用电磁感应原理，将某一数值的交变电压变换为同频率的另一数值的交变电压。作为电能传输或信号传输的装置，变压器在电力系统和自动控制系统中得到了广泛应用，在国民经济的其他部门，作为特种电源或为满足特殊的需要，变压器也发挥着重要作用。

变压器是基于电磁感应定律而工作的，交变磁场是它工作的媒介，这一点与其他旋转的电机相似，所以变压器可视为静止的电机，与旋转电机的能量转换作用不同，它只能起到能量传递的作用。

本章以普通双绕组电力变压器为主要研究对象，着重分析单相变压器的基本原理、带负载稳态运行的电磁关系及运行特性等。对于三相变压器，当带对称负载稳态运行时，每一相的情况与单相变压器一样，故无须讨论；但其电路和磁路特点，却与单相变压器不同，要加以探讨。对于自耦变压器、仪用互感器及电焊变压器等略加介绍。

知识要求

- (1) 了解变压器的结构，掌握电力变压器主要部件的名称及作用。
- (2) 掌握变压器的工作原理及分类。
- (3) 了解变压器的铭牌，掌握变压器的主要参数。
- (4) 了解变压器的分析方法，掌握变压器的运行特性。
- (5) 了解三相变压器的磁路及电路。
- (6) 了解三相变压器的连接组别。
- (7) 了解三相变压器的并联运行及其要求。
- (8) 掌握自耦变压器、仪用互感器及电焊变压器的结构及工作原理。

技能要求

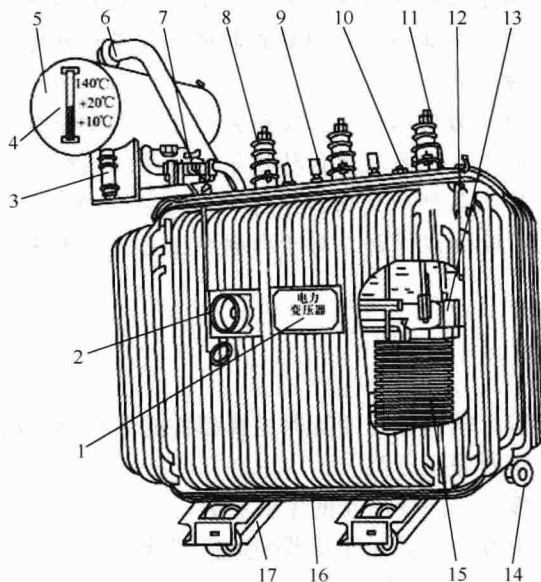
- (1) 认识三相变压器的外形结构，能进行简单的运行巡视。
- (2) 了解三相变压器的铭牌，会正确读取铭牌参数。
- (3) 能识别三相变压器的接线方式，能说明变压器的连接组。
- (4) 能对单相变压器进行变压比及运行特性的测定。
- (5) 能正确使用自耦变压器、仪用互感器及电焊变压器。

1.1 变压器的结构

变压器的结构包括铁芯和绕组两个基本部分,以及放置器身且盛满变压器油的油箱。此外,还有一些为确保变压器运行安全的辅助器件。如图 1.1 所示为一台油浸式电力变压器的外形结构图。

下面介绍各主要零部件的结构及作用。

(1) 铁芯。铁芯的作用是构成变压器的磁路。为了减少铁芯内的磁滞及涡流损耗,铁芯通常由厚度为 0.35mm 或 0.5mm 的电工硅钢片叠装而成。钢片叠装的形式分别如图 1.2 和图 1.3 所示。铁芯被线圈套住的部分称为铁芯柱,其余部分称为磁轭。为了改善铁芯冷却条件,在某些大型变压器铁芯柱中开设油道以利于散热。



1—铭牌; 2—信号式温度计; 3—吸湿器; 4—油表; 5—储油柜; 6—安全气道; 7—气体继电器; 8—高压套管; 9—低压套管; 10—分接开关; 11—油箱; 12—变压器; 13—铁芯; 14—放油阀门; 15—绕组; 16—接地; 17—小车

图 1.1 油浸式电力变压器的外形结构图

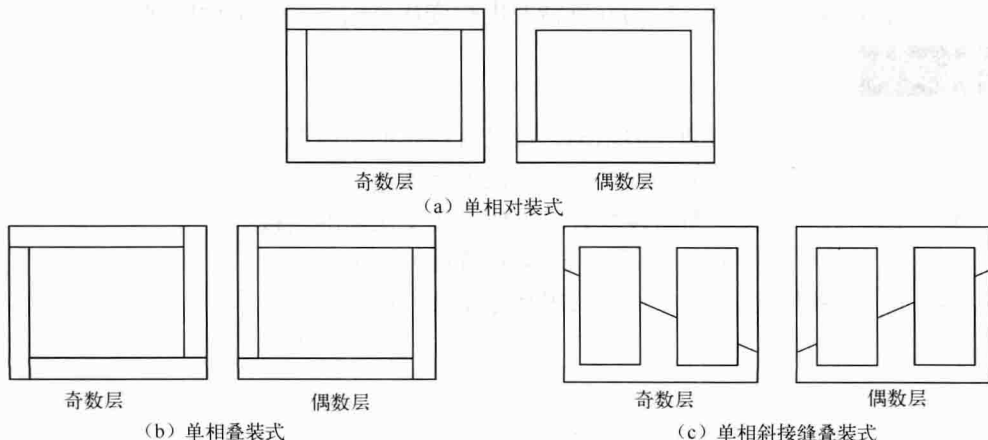


图 1.2 单相铁芯叠装形式

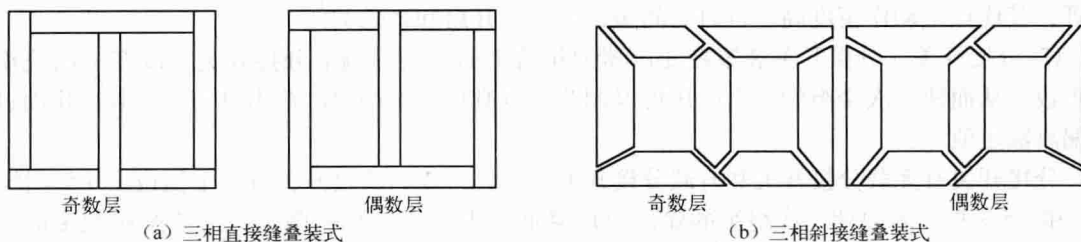


图 1.3 三相铁芯叠装形式

(2) 绕组。绕组是变压器的电路部分，通常由扁形或圆形绝缘导线绕制而成。与电源相连接的绕组，接收交流电能，通常称为一次绕组（又称原边绕组或初级绕组）；与负载相连接的绕组，送出交流电能，通常称为二次绕组（又称副边绕组或次级绕组）。

变压器的一次绕组和二次绕组具有不同的匝数、电压和电流，其中电压较高的绕组称为高压绕组，电压较低的绕组称为低压绕组。根据高、低压绕组的相对位置，变压器绕组可分为同心式和交叠式两种。同心式绕组是高、低压绕组同心套在铁芯柱上，一般低压绕组在里，高压绕组在外，以利于绝缘，如图 1.4 所示。同心式绕组结构简单、制造方便，使用也最为普遍。交叠式绕组的高、低压绕组是沿轴向交叠放置的，如图 1.5 所示。交叠式绕组的引线比较简单，机械强度好，易构成多条并联支路，因此常用于大电流变压器中，如电炉变压器、电焊变压器等。

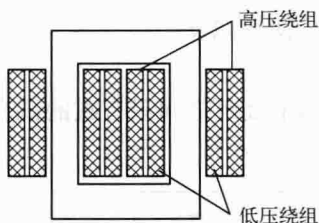


图 1.4 同心式绕组

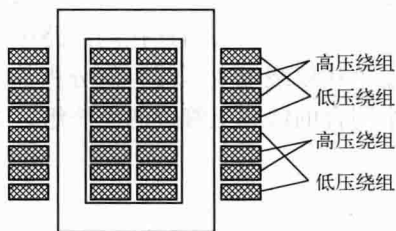


图 1.5 交叠式绕组

(3) 油箱及其他零部件。

① 油箱。油箱有三个作用：一是盛装变压器油；二是容纳铁芯及绕组；三是用于散热，即通过变压器油将绕组和铁芯中的热量传递到油箱壁，进而再通过油箱壁散到周围介质中去。

② 绝缘套管。绝缘套管安装在油箱盖上（有时装在油箱壁上），套管中有导电杆，用于连接变压器油箱内的绕组及外电路。

③ 变压器油。变压器油有两个作用：一是在油箱内除器身外，全部空间被变压器油填充，以加强绝缘；二是通过油的对流作用，加强散热。

④ 储油柜。储油柜又称油枕，其作用是当变压器油热胀时，将油收藏起来；当冷却时，将油灌进油箱，保证变压器的油箱始终处在盛满状态。

⑤ 气体继电器。在油箱和储油柜之间的连接管中装有气体继电器，当变压器发生故障时，内部绝缘物汽化，使气体继电器动作，发出报警信号或使开关跳闸。

⑥ 防爆管。防爆管又称安全气道，装设在油箱顶部，它是一个长的圆形钢筒，上端用酚醛纸板密封，下端与油箱连通。若变压器发生故障，使油箱内压力骤增时，油流冲破酚醛纸板，以免造成变压器箱体爆裂。近年来，国产电力变压器已广泛采用压力释放阀来取代防

爆管,其优点是动作精度高、延时时间短,能自动开启和自动关闭。

⑦ 分接开关。分接开关装置在变压器油箱盖上面,通过调节分接开关来改变一次绕组的匝数,从而使二次绕组的输出电压可以调节,以避免二次绕组的输出电压因负载变化而过分偏离额定值。

分接开关有无载分接开关和有载分接开关两种。一般的分接开关有三个挡位, +5% 挡、0 挡和 -5% 挡。若要使二次绕组的输出电压降低,则将分接开关调至一次绕组匝数多的一挡,即 +5% 挡;若要使二次绕组的输出电压升高,则将分接开关调至一次绕组匝数少的一挡,即 -5% 挡。

变压器除上述几种基本部件外,还有吸湿器、信号式温度计、放油阀门等,在图 1.1 中均已标出它们的外形及安装位置,在此不再介绍。



1.2 变压器的工作原理

如图 1.6 所示,当变压器一次绕组接通交流电源时,接二次绕组的灯泡便发光。为什么彼此相互绝缘的两个绕组当一侧接电源时,另一侧便会跟随产生电流呢?

利用电磁感应原理,处在变化磁场中的导体,产生感应电动势,当外电路通过灯泡闭合时,便有电流通过,使灯泡发光。具体来说,就是当一次绕组接上交流电源时,在一次绕组中就有交流电流通过,此电流将在铁芯中产生交变磁通,此磁通在铁芯中同时交链一、二次绕组。于是,在这两个绕组中都会产生感应电动势。显然,对负载来说,二次绕组的电动势相当于电源,在与二次绕组连接的回路中,便有电流通过,使灯泡发光。

下面以单相双绕组变压器为例分析其工作原理。

在一个闭合的铁芯上缠绕两个绕组,如图 1.7 所示,两个绕组之间只有磁的耦合,没有电的联系。

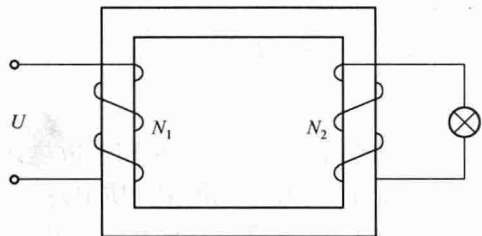


图 1.6 电磁感应现象演示

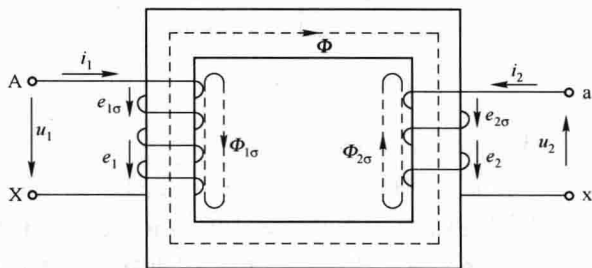


图 1.7 单相双绕组变压器原理图

一次绕组以 A、X 标注其出线端,与一次绕组相关的物理量均以下角标“1”来表示,二次绕组以 a、x 标注其出线端,与二次绕组相关的物理量均以下角标“2”来表示。例如,一次绕组的匝数、电压、感应电动势、电流分别以 N_1 、 u_1 、 e_1 、 i_1 来表示;二次绕组的匝数、电压、感应电动势、电流分别以 N_2 、 u_2 、 e_2 、 i_2 来表示。

当一次绕组接通电源时,便会在铁芯中产生与电源电压同频率的交变磁通 Φ 。忽略漏磁通 Φ_σ ,该磁通同时与一次绕组、二次绕组相交链,这样的变压器称为理想变压器。根据电磁感应定律,在一次绕组、二次绕组中便会感应出电动势,分别为

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2)$$

当二次绕组开路（即空载）时，如忽略绕组压降（仅占 u_1 的 0.01% 不到），则有

$$u_1 = e_1 \quad (1-3)$$

$$u_2 = e_2 \quad (1-4)$$

于是有

$$\frac{|u_1|}{|u_2|} = \frac{|e_1|}{|e_2|} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad (1-5)$$

式中， K 称为变压器的变压比，其大小由变压器的结构参数 N_1 、 N_2 所决定。

由此可见，通过选用不同于一次绕组匝数 N_1 的二次绕组匝数 N_2 ，便可使二次绕组的电压 u_2 不等于一次绕组的电压 u_1 ，而获得所需要的电压值。

综上所述，变压器以一次绕组和二次绕组能同时交链铁芯中同一变化磁通的特有结构，利用电磁感应原理，将一次绕组吸收电源的电能量传送给二次绕组所连接的负载——实现能量的传送，使匝数不同的一次绕组和二次绕组中感应出大小不等的电动势——实现电压等级的变换，这就是变压器的基本工作原理。

1.3 变压器的分类

变压器不仅对电力系统中电能的传输、分配和安全使用有着重要意义，而且广泛用于电气控制领域、电子技术领域、测试技术领域和焊接技术领域等。变压器的种类繁多，可按其用途、绕组结构、铁芯结构、相数、冷却方式等进行分类。各种类型变压器的外形如图 1.8 所示。



图 1.8 各种类型变压器的外形