



中等职业学校教学用书(电气运行与控制专业)

电机拖动与电控技术 (第2版)

◎程 周 主编

本书配有电子教学参考资料包



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

中等职业学校教学用书（电气运行与控制专业）

电机拖动与电控技术

（第2版）

程 周 主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从应用的角度, 详实地介绍电机技术、电气控制技术两部分既有联系又相对独立的内容。全书共 15 章, 内容包括: 变压器, 交流异步电动机, 直流电机, 控制电机, 电力拖动电动机的机械特性与选择, 常用低压电器, 低压电器的常见故障诊断与维修, 继电器—接触器的基本控制环节, 三相交流异步电动机的启动、制动和调速控制, 直流电动机的控制线路, 以及车床等常用机床的电气控制。

本书适用于中等职业学校电气运行与控制专业、机电技术应用专业、电子技术应用专业、仪表类专业及相关专业学生, 同时对于工程技术人员来说也是一本很好的自学教材。

本书还配有电子教学参考资料包(包括教学指南、电子教案和习题答案), 详见前言。

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

电机拖动与电控技术/程周主编. —2版. —北京: 电子工业出版社, 2007.3

中等职业学校教学用书. 电气运行与控制专业

ISBN 978-7-121-03779-5

I. 电… II. 程… III. ①电机—电力传动—专业学校—教材 ②电机—控制系统—专业学校—教材
IV. TM30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 005375 号

责任编辑: 陈健德 徐 萍

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: 16 字数: 409.6 千字

印 次: 2007 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 5 000 册 定价: 22.00 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, 联系电话: (010) 68279077; 邮购电话: (010) 88254888。

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

服务热线: (010) 88258888。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

中等职业学校教材工作领导小组

- 组 长：**陈贤忠 安徽省教育厅厅长
- 副组长：**李雅玲 信息产业部人事司技术干部处处长
尚志平 山东省教学研究室副主任
眭 平 江苏省教育厅职社处副处长
苏渭昌 教育部职业技术教育中心研究所所长
王传臣 电子工业出版社副社长
- 组 员（排名不分先后）：**
- 唐国庆 湖南省教科院
张志强 黑龙江省教育厅职成教处
李 刚 天津市教委职成教处
王润拽 内蒙古自治区教育厅职成教处
常晓宝 山西省教育厅职成教处
刘 晶 河北省教育厅职成教处
王学进 河南省职业技术教育教学研究室
刘宏恩 陕西省教育厅职成教处
吴 蕊 四川省教育厅职成教处
左其琨 安徽省教育厅职成教处
陈观诚 福建省职业技术教育中心
邓 弘 江西省教育厅职成教处
姜昭慧 湖北省职业技术教育研究中心
李栋学 广西壮族自治区教育厅职成教处
杜德昌 山东省教学研究室职教室
谢宝善 辽宁省基础教育教研培训中心职教部
安尼瓦尔·吾斯曼 新疆维吾尔自治区教育厅职成教处
- 秘书长：**李 影 电子工业出版社
- 副秘书长：**蔡 葵 电子工业出版社

前 言



本书是 2002 年 8 月出版的“中等职业学校电子信息类教材（电气运行与控制专业）”《电机拖动与电控技术》一书的修订本。

修订本的基本思路是：抓住中等职业教育特点，进一步使教材结构符合职业教育教学规律；教材内容符合社会经济对职业教育的要求；教材程度符合中等职业学校学生的知识水平。

修订本对各部分的重点和难点进行了调整，使内容安排更加科学、严谨、合理。就整体而言，修订后的书稿内容突出了工程技术应用的基础知识与初中级技能型、应用型人才应该具备的专业知识。

修订本强调“学以致用”，对构成电气工程技术的各种环节或器件以“用”为目标进行编排。在注重基础知识与理论为技术应用服务的前提下，强调了元器件的外部特性与使用，淡化其内部机理，删除深奥的理论说明和复杂的参数计算及公式的推导等。这种编写方案有利于学生把握学习重点，分清主次，明确该课程的学习目的。

修订本增加了“第 5 章 电力拖动电动机的机械特性与选择”，“第 7 章 低压电器的常见故障诊断与维修”。在“第 11 章 车床的电气控制”，“第 12 章 磨床的电气控制”，“第 13 章 摇臂钻床的电气控制”，“第 14 章 卧式镗床的电气控制”，“第 15 章 铣床的电气控制”中分别增加了“车床、磨床、摇臂钻床、卧式镗床和铣床的电气故障诊断与维修”内容。删除了“第 1 章 变压器”、“第 2 章 交流异步电动机”、“第 3 章 直流电机”、“第 4 章 控制电机”中过细的理论说明和复杂的参数计算及公式的推导，增加了新的实用知识和技能。

修订后的书稿在围绕目前仍有广泛应用的一些传统技术与系统的基础上讲述有关基本知识与理论，充分考虑到了技术的发展，补充了一定数量的、实用性强的新知识与新技术。

本书由安徽职业技术学院实训中心程周主编，由耿淬主审。主审以严谨的科学态度和高度负责的精神，认真阅读书稿，并提出许多宝贵的修改意见。在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。联系电子邮箱：ahchzh@163.com。

为了方便教师教学，本书还配有教学指南、电子教案及习题答案（电子版）。请有此需要的教师登录华信教育资源网（www.huaxin.edu.cn 或 www.hxedu.com.cn）免费注册后再进行下载，有问题时请在网站留言板留言或与电子工业出版社联系（E-mail:hxedu@phei.com.cn）。

程 周
2007 年 1 月





第 1 章 变压器	(1)
1.1 变压器的基本结构与铭牌技术数据	(1)
1.1.1 变压器的基本结构	(1)
1.1.2 变压器的铭牌技术数据	(3)
1.2 变压器的工作原理	(3)
1.2.1 变压器的空载运行	(3)
1.2.2 变压器的负载运行	(5)
1.2.3 变压器的运行特性	(6)
1.3 三相变压器	(7)
1.3.1 三相变压器的连接组	(7)
1.3.2 三相变压器的并联	(10)
1.4 其他用途的变压器	(10)
1.4.1 自耦变压器	(10)
1.4.2 仪用互感器	(11)
1.4.3 电焊变压器	(12)
习题 1	(13)
第 2 章 交流异步电动机	(16)
2.1 三相交流异步电动机的基本原理、结构与类型	(16)
2.1.1 三相交流异步电动机的基本原理	(16)
2.1.2 三相交流异步电动机的基本结构与类型	(18)
2.1.3 三相交流异步电动机的额定值与型号	(20)
2.2 三相交流异步电动机的运行特性	(20)
2.2.1 三相交流异步电动机的机械特性	(20)
2.2.2 三相交流异步电动机的工作特性	(22)
2.3 三相交流异步电动机的启动	(23)
2.3.1 笼型异步电动机的启动	(23)
2.3.2 绕线式异步电动机的启动	(26)
2.4 三相交流异步电动机的调速	(27)
2.4.1 变极调速	(27)
2.4.2 变频调速	(29)
2.4.3 变转差率调速	(30)
2.5 三相交流异步电动机的制动	(31)

2.5.1	反接制动	(31)
2.5.2	回馈制动	(32)
2.5.3	能耗制动	(33)
2.6	单相交流异步电动机	(34)
2.6.1	单相交流异步电动机的工作原理与机械特性	(34)
2.6.2	单相交流异步电动机的启动类型	(35)
习题 2	.....	(37)
第 3 章	直流电机	(40)
3.1	直流电机的工作原理、基本结构和励磁方式	(40)
3.1.1	直流电机的工作原理	(40)
3.1.2	直流电机的基本结构	(41)
3.1.3	直流电机的励磁方式	(44)
3.1.4	直流电机的铭牌数据和系列	(45)
3.2	直流电机的电枢绕组	(46)
3.2.1	电枢绕组概述	(46)
3.2.2	电枢绕组的基本形式	(47)
3.3	直流电机的感应电动势和电磁转矩	(49)
3.4	直流电动机的工作特性	(49)
3.4.1	他励(并励)电动机的工作特性	(49)
3.4.2	串励电动机的工作特性	(50)
3.5	直流电动机的机械特性	(51)
3.5.1	他励电动机的机械特性	(51)
3.5.2	电动机的稳定运行条件	(52)
3.6	他励直流电动机的启动与反转	(53)
3.6.1	启动条件	(53)
3.6.2	启动方法	(54)
3.6.3	反转	(54)
3.7	他励直流电动机的调速	(54)
3.7.1	电枢串电阻调速	(55)
3.7.2	弱磁调速	(55)
3.7.3	降压调速	(56)
3.8	他励直流电动机的电气制动	(56)
3.8.1	能耗制动	(56)
3.8.2	反接制动	(57)
3.8.3	回馈制动(再生制动)	(58)
习题 3	.....	(58)
第 4 章	控制电机	(60)
4.1	测速发电机	(60)
4.1.1	直流测速发电机	(60)

4.1.2	交流测速发电机	(61)
4.2	伺服电动机	(62)
4.2.1	直流伺服电动机	(62)
4.2.2	交流伺服电动机	(63)
4.3	直流力矩电动机	(64)
4.3.1	直流力矩电动机的结构和原理	(64)
4.3.2	直流力矩电动机的特点	(65)
4.4	自整角机	(65)
4.4.1	力矩式自整角机的工作原理	(65)
4.4.2	控制式自整角机的工作原理	(66)
4.5	步进电动机	(67)
4.5.1	单段反应式步进电动机	(67)
4.5.2	多段式步进电动机	(69)
4.6	旋转变压器	(70)
4.6.1	正、余弦旋转变压器	(70)
4.6.2	线性旋转变压器	(71)
习题 4	.....	(71)
第 5 章	电力拖动电动机的机械特性与选择	(73)
5.1	生产机械的机械特性	(73)
5.2	电动机的机械特性	(74)
5.2.1	电动机的固有机机械特性	(74)
5.2.2	电动机的人为机械特性	(75)
5.3	电力拖动电动机的选择	(77)
5.3.1	电动机容量的选择	(77)
5.3.2	电动机电流种类的选择	(78)
5.3.3	电动机额定电压的选择	(79)
5.3.4	电动机额定转速的选择	(79)
5.3.5	电动机型式的选择	(80)
习题 5	.....	(80)
第 6 章	常用低压电器	(82)
6.1	低压电器的基本知识	(82)
6.2	常用低压电器的结构和工作原理	(84)
6.2.1	刀开关	(84)
6.2.2	熔断器	(92)
6.2.3	按钮开关	(93)
6.2.4	接触器	(95)
6.2.5	继电器	(100)
6.2.6	行程开关	(111)
6.2.7	自动开关	(113)

习题 6	(115)
第 7 章 低压电器的常见故障诊断与维修	(118)
7.1 低压电器触点系统的故障诊断与维修	(118)
7.1.1 触点系统的工作情况	(118)
7.1.2 触点系统的故障诊断与维修	(120)
7.2 电磁机构的故障诊断与维修	(121)
7.3 低压电器灭弧装置的故障诊断与维修	(122)
7.4 低压电器的一般故障诊断与维修	(122)
习题 7	(125)
第 8 章 继电器—接触器的基本控制环节	(126)
8.1 电气图中的图形符号和文字符号	(126)
8.1.1 电气图中的图形符号	(126)
8.1.2 电气图中的文字符号	(127)
8.2 电气图的分类与作用	(128)
8.2.1 电气原理图	(128)
8.2.2 电气安装图	(128)
8.2.3 电气互连图	(129)
8.3 点动与长动控制	(130)
8.3.1 点动控制线路	(130)
8.3.2 长动控制线路	(131)
8.3.3 长动与点动控制线路	(132)
8.4 正、反转控制	(133)
8.5 位置控制	(135)
8.6 顺序和多点控制	(139)
8.6.1 顺序控制线路	(139)
8.6.2 多点控制线路	(140)
8.7 时间控制	(140)
习题 8	(141)
第 9 章 三相交流异步电动机的启动、制动和调速控制	(143)
9.1 三相笼型交流异步电动机的启动控制	(143)
9.1.1 全压启动控制线路	(143)
9.1.2 定子绕组串电阻启动控制	(144)
9.1.3 星形—三角形启动控制	(145)
9.1.4 自耦变压器启动控制	(147)
9.1.5 延边三角形启动控制	(149)
9.2 绕线式异步电动机的启动控制	(151)
9.2.1 转子串电阻启动控制	(151)
9.2.2 转子串频敏变阻器启动控制	(153)
9.3 三相笼型交流异步电动机的制动控制	(154)

9.3.1	反接制动控制线路	(155)
9.3.2	能耗制动控制线路	(156)
9.4	三相交流异步电动机的调速控制	(157)
9.4.1	改变极对数的调速电路	(157)
9.4.2	改变转差率的调速电路	(160)
9.4.3	变频调速	(160)
习题 9	.....	(164)
第 10 章	直流电动机的控制线路	(166)
10.1	他励直流电动机的启动控制	(166)
10.2	他励直流电动机的正、反转控制	(168)
10.3	直流电动机的制动控制	(170)
10.4	直流电动机的保护	(172)
习题 10	.....	(173)
第 11 章	车床的电气控制	(174)
11.1	概述	(174)
11.1.1	机床电气线路的读图方法	(174)
11.1.2	机床电气设备的日常维护和保养	(174)
11.1.3	机床电气控制线路的故障诊断与维修方法	(177)
11.1.4	普通车床的主要结构与运动形式	(178)
11.2	C620 车床的电气控制	(179)
11.3	C650 车床的电气控制	(181)
11.4	CA6140 车床的电气控制	(184)
11.5	CW6163B 车床的电气控制	(187)
11.6	车床的电气故障诊断与维修	(189)
11.6.1	C650 车床的电气故障诊断与维修	(189)
11.6.2	CA6140 车床的电气故障诊断与维修	(191)
11.6.3	CW6163B 车床的电气故障诊断与维修	(193)
第 12 章	磨床的电气控制	(195)
12.1	平面磨床的主要结构与运动形式	(195)
12.2	M7120 磨床的电气控制	(196)
12.3	M1432 万能外圆磨床的电气控制	(200)
12.4	M7140 磨床的电气控制	(205)
12.4.1	M7140 磨床的电路原理分析	(205)
12.4.2	M7140 磨床的电气故障诊断与维修	(208)
第 13 章	摇臂钻床的电气控制	(211)
13.1	摇臂钻床的主要结构与运动形式	(211)
13.2	Z35 摇臂钻床的电气控制	(212)
13.3	Z3040 摇臂钻床的电气控制	(216)

13.4	Z35 摇臂钻床的电气故障诊断与维修	(219)
第 14 章	卧式镗床的电气控制	(221)
14.1	卧式镗床的主要结构与运动形式	(221)
14.2	T68 卧式镗床的电气控制	(222)
14.2.1	主电路	(224)
14.2.2	控制电路	(224)
14.3	T612 镗床的电气控制	(226)
14.3.1	主电路	(228)
14.3.2	控制电路	(228)
14.4	T612 镗床的电气故障诊断与维修	(230)
第 15 章	铣床的电气控制	(234)
15.1	万能铣床的主要结构与运动形式	(234)
15.2	X62W 万能铣床的电气控制	(235)
15.2.1	主电路	(237)
15.2.2	控制电路	(237)
15.2.3	照明控制	(240)
15.2.4	冷却泵电动机 M_3	(240)
15.3	X62W 万能铣床的电气故障诊断与维修	(240)
15.3.1	主轴电动机控制电路故障	(240)
15.3.2	工作台进给控制电路故障	(241)
参考文献	.....	(242)

第1章 变 压 器



本章主要介绍单相变压器的结构和原理,分析在稳态对称运行条件下,变压器空载运行和负载运行时的电磁关系。本章还对变压器运行时的输出电压变化率、变压器效率及三相变压器并联运行加以介绍,并简要概述其他类型的变压器。

1.1 变压器的基本结构与铭牌技术数据

1.1.1 变压器的基本结构

电力变压器的基本部件是铁心和绕组,此外还有油箱和其他附件,如图 1.1 所示。

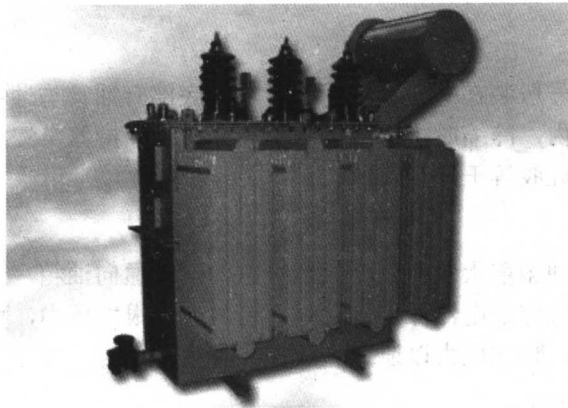


图 1.1 油浸式电力变压器

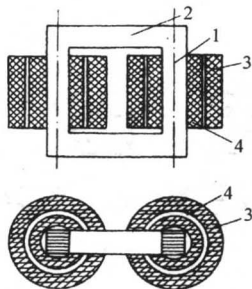
1. 铁心

铁心是变压器中的磁路部分。为了减少铁心内的涡流损耗和磁滞损耗,铁心通常采用表面经绝缘处理的冷轧硅钢片叠装而成。硅钢片具有较优良的导磁性能和较低的损耗。

铁心分为铁心柱和铁轭(磁轭)两部分,铁心柱上套有绕组,磁轭作为连接磁路之用。铁心结构的基本形式有心式和壳式两种,如图 1.2 和图 1.3 所示。

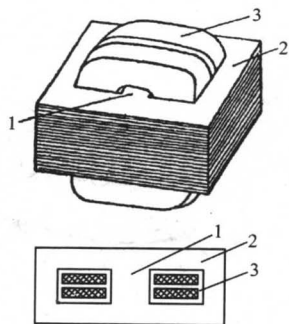
2. 绕组

绕组是变压器的电路部分,应具较高的耐热、机械强度及良好的散热条件,以保证变压器的可靠运行。与电源相连的叫一次绕组或原绕组,与负载相连的叫二次绕组或副绕组。也可根据电压大小分为高压、低压绕组。



1—铁心柱;2—铁轭;3—高压绕组;4—低压绕组

图 1.2 单相心式变压器



1—铁心柱;2—铁轭;3—绕组

图 1.3 单相壳式变压器

3. 油箱和其他附件

(1) 油箱

变压器油是经提炼的绝缘油,绝缘性能比空气好。它是一种冷却介质,通过热对流方法,及时将绕组和铁心产生的热量传到油箱和散热油管壁,向四周散热,使变压器的温升不致超过额定值。变压器油按要求应具有低的黏度,高的发火点和低的凝固点,不含杂质和水分。

(2) 储油柜

储油柜又称油枕,一般装在变压器油箱上面,其底部有油管与油箱相通。当变压器油热胀时,将油收进储油柜内,冷缩时,将油灌回油箱,始终保持器身浸在油内。油枕上还装有吸湿器,内含氧化钙或硅胶等干燥剂。

(3) 安全气道

较大容量的变压器油箱盖上装有安全气道,它的下端通向油箱,上端用防爆膜封闭。当变压器发生严重故障或气体继电器保护失败时,箱内产生很大压力,可以冲破防爆膜,使油和气体从安全气道喷出,释放压力以避免造成重大事故。

(4) 气体继电器

气体继电器安装在油箱与油枕之间的三连通管中。当变压器发生故障时,内部绝缘材料及变压器油受热分解,产生气体沿连通管进入气体继电器,使之动作,接通继电器保护电路发出信号,以便工作人员进行处理,或引起变压器前方断路器跳闸保护。

(5) 绝缘套管

作为高、低压绕组的出线端,在油箱上装有高、低压绝缘套管,使变压器进、出线与油箱(地)之间绝缘。高压(10kV以上)套管采用空心充气式或充油式瓷套管,低压(1kV以下)套管采用实心瓷套管。

(6) 分接开关

箱盖上的分接开关,可以在空载情况下改变高压绕组的匝数($\pm 5\%$),以调节变压器的输出电压,改善电压质量。



1.1.2 变压器的铭牌技术数据

为保证变压器的安全运行和方便用户正确使用变压器，在其外壳上设有一块铝制刻字的铭牌。铭牌上的数据为额定值。

1. 额定电压 U_{1N}/U_{2N}

额定电压 U_{1N} 是指交流电源加到一次绕组上的正常工作电压； U_{2N} 是指在一次绕组加 U_{1N} 时，二次绕组开路时（空载）的端电压。在三相变压器中，额定电压是指线电压。

2. 额定电流 I_{1N}/I_{2N}

额定电流是变压器绕组允许长时间连续通过的最大工作电流，由变压器绕组的允许发热程度决定。在三相变压器中额定电流是指线电流。

3. 额定容量 S_N

额定容量是指在额定条件下，变压器最大允许输出，即视在功率。通常把变压器一、二次绕组的额定容量设计得相同。在三相变压器中 S_N 是指三相总容量。额定电压、额定电流、额定容量三者关系如下。

$$\begin{aligned} \text{单相:} \quad & I_{1N} = \frac{S_N}{U_{1N}}, \quad I_{2N} = \frac{S_N}{U_{2N}} \\ \text{三相:} \quad & I_{1N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{1N}}, \quad I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} \end{aligned}$$

4. 额定频率 f_N

我国规定标准工业用电的频率为 50Hz。除此之外，铭牌上还有效率 η 、温升 τ 、短路电压标么值 u_k 、连接组别号、相数 m 等。

1.2 变压器的工作原理

变压器的工作原理可参考图 1.4。当一次绕组输入端接交流电源时，产生交流电流，这一电流将产生交变磁通从铁心通过，由于一、二次绕组套在同一铁心上，所以，交变磁通同时交链一、二次绕组。根据电磁感应定律，必然在两绕组上都感生出电动势，在二次绕组上感应的电动势即作为负载的直接电源，若负载接上，便有电流通过。可见，一次绕组从交流电源获得电能并转换成磁场能传递到二次绕组，然后还原成不同于交流电源电压等级的电能再供给负载。负载所消耗的电能最终还是来自一次绕组的交流电源，变压器本身不产生电能，仅起传递电能、变换电压的作用。

1.2.1 变压器的空载运行

1. 变压器中各物理量正方向的规定

变压器中各物理量的正方向一般按照电工惯例来规定，称为“惯例方向”，如图 1.4 所

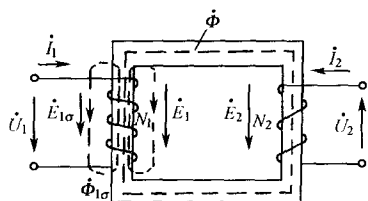


图 1.4 变压器空载运行原理图

示。图中同一支路，电压降的正方向与电流的正方向一致；磁通的正方向与电流的正方向之间符合右手螺旋定则关系；由交变磁通所产生的感应电动势，其正方向与产生该磁通的电流正方向一致。或者说，感应电动势的正方向与产生它的磁通正方向成右手螺旋定则关系。在此关系下， $e = -Nd\Phi/dt$ 。

2. 空载运行时的物理情况

变压器的一次绕组接在额定电压、额定频率的交流电源上，二次绕组开路无电流的运行状态，称为空载运行。

变压器的一次绕组匝数为 N_1 ，二次绕组匝数为 N_2 ，一次绕组接电源电压 U_1 ，空载时一次绕组中的电流为 I_0 ，叫空载电流。它在一次绕组中建立空载磁动势 $F_0 = I_0 N_1$ 。在 F_0 作用下，铁心磁路中产生磁通，因此，空载磁动势又叫励磁磁动势，空载电流又叫励磁电流。变压器中磁通分布较复杂，为便于研究，将其分为两部分：一部分是同时交链着一次绕组和二次绕组的主磁通 Φ ；另一部分是只交链一次绕组本身而不交链二次绕组的漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 。主磁通 Φ 沿铁心闭合，漏磁通沿非铁磁性材料（空气或变压器油等）闭合。由于铁心的导磁系数比空气和油等的导磁系数大得多，所以空载时主磁通占总磁通的绝大多数，漏磁通只占 0.2% 左右。两者都是空载磁动势或空载电流产生的，主磁通 Φ 与空载电流 I_0 之间的关系由其磁路性质决定是非线性的，即 Φ 与 I_0 不成正比；而漏磁通磁路主要是非铁磁材料，是线性的，即 $\Phi_{1\sigma}$ 与 I_0 成正比关系。另外，漏磁通只交链一次绕组，仅在一次绕组上感应电动势，起电压降作用而不能传递能量；主磁通可在一次、二次绕组上都感应电动势，若二次绕组带上负载，二次绕组电动势即可输出电功率，所以主磁通是能量传递的桥梁。

一次绕组所加正弦交流电源电压的频率为 f_1 ，主磁通、漏磁通及其感应电动势也是频率为 f_1 的正弦交流量。根据电磁感应定律，主磁通 Φ 分别在一次、二次绕组上感应电动势 e_1 和 e_2 ，漏磁通在一次绕组中感应漏电动势 $e_{1\sigma}$ 。

设主磁通 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，漏磁通 $\Phi_{1\sigma} = \Phi_{1\sigma m} \sin \omega t$ ，代入 $e = -Nd\Phi/dt$ ，可得

$$e_1 = \omega N_1 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$e_2 = \omega N_2 \Phi_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{2m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$e_{1\sigma} = \omega N_1 \Phi_{1\sigma m} \sin(\omega t - 90^\circ) = E_{1\sigma m} \sin(\omega t - 90^\circ)$$

各电动势有效值分别为

$$E_1 = E_{1m} / \sqrt{2} = 4.44 f_1 N_1 \Phi_m \quad (1-1)$$

$$E_2 = E_{2m} / \sqrt{2} = 4.44 f_1 N_2 \Phi_m \quad (1-2)$$

$$E_{1\sigma} = E_{1\sigma m} / \sqrt{2} = 4.44 f_1 N_1 \Phi_{1\sigma m} \quad (1-3)$$

由上述表达式可见：感应电动势正比于产生它的磁通最大值、频率及绕组匝数，其相位滞后于相应的磁通 90° 。一、二次绕组感应电动势之比为变压器的变比，用 k 表示，也等于匝数之比。当变压器空载运行时，一次绕组忽略绕组阻抗， $U_1 \approx E_1$ ；二次绕组 $U_2 = E_2$ ，故

$$k = E_1 / E_2 = N_1 / N_2 \approx U_1 / U_2 \quad (1-4)$$



3. 空载电流

在变压器中建立磁场时只需要从电源输入无功功率，因此用来产生主磁通的电流与主磁通 Φ 同相位，而落后于电源电压 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$ 的相位 90° ，此电流称之为磁化电流，用 \dot{i}_μ 表示，在变压器中，也称之为励磁电流的无功分量。

铁心中存在着磁滞损耗和涡流损耗。也就是说，建立主磁通 Φ 除了需要从电源输入无功功率外，还需要输入有功功率，即励磁电流中存在一个与 \dot{U}_1 同相位的电流分量，它就是励磁电流的有功分量，用 \dot{i}_{Fe} 表示。磁滞和涡流损耗的结果都因消耗有功功率而使铁心发热，对变压器是不利的，所以变压器铁心材料应该选用软磁材料，并且要片间彼此绝缘，这样可以尽量减少 \dot{i}_{Fe} 的数值。

图 1.5 所示为励磁电流、主磁通及其感应电动势的相量图。由图可见， \dot{i}_0 比 Φ 在相位上超前一个角度，叫做铁耗角，一般很小，可忽略。

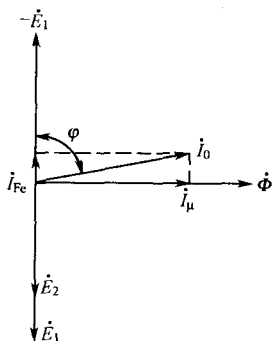


图 1.5 励磁电流与主磁通及其感应电动势相量图

在一般电力变压器中， $I_0 = (0.02 \sim 0.1)I_{1N}$ ，容量越大， \dot{i}_0 相对越小。因空载时有功分量很小，绝大部分是无功分量，所以变压器空载功率因数很低。

1.2.2 变压器的负载运行

1. 负载运行的物理情况和功率的传递

变压器一次绕组接在额定电压和额定频率的交流电源上，二次绕组接入负载时的运行状态，叫做变压器负载运行。图 1.6 为变压器负载运行的原理示意图。

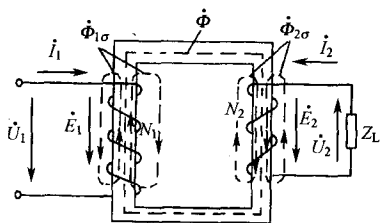


图 1.6 变压器负载运行原理图

负载运行时，二次绕组输出端接上负载 Z_L ，在 E_2 的作用下产生二次电流 i_2 ，二次绕组则出现磁动势 $\dot{F}_2 = i_2 N_2$ ，与一次磁动势 \dot{F}_1 共同作用于同一铁心磁路。这样， \dot{F}_2 的出现就有可能使原来空载时的主磁通发生变化，并且影响感应电动势 \dot{E}_1 和 \dot{E}_2 也发生变化，打破原来的电磁平衡状态。其实，在实际的电力变压器中， Z_L 一般被设计得很小，只要空载和负载时电压 \dot{U}_1 不变，一次绕组感应电动势 \dot{E}_1 就基本相同。由式 (1-1) 可知，空载和负载时主磁通 Φ

也是基本相同的，即负载时磁路总的合成磁动势等于空载时的励磁磁动势 \dot{F}_0 。

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0$$

或

$$\dot{i}_1 N_1 + \dot{i}_2 N_2 = \dot{i}_0 N_1 \tag{1-5}$$

这就是变压器负载运行的磁动势平衡式，也适用空载 $i_2 = 0$ ， $i_1 = i_0$ 的情况。式中 \dot{F}_1 可以看成一次绕组在空载磁动势 \dot{F}_0 的基础上增加了一个 $(-\dot{F}_2)$ 的磁动势，这个增加量正好与