



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

程 周 主编
马红杰 主审

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

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

程 周 主编

马红杰 主审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书依据教育部最新颁布的“电气运行与控制专业教学指导方案”编写而成。全书从应用的角度,详实地介绍了电机技术、电气控制技术两部分既有联系,又相对独立的内容。它包括:变压器、三相异步电机、直流电动机、控制电机、常用低压电器、继电器-接触器控制基本环节、三相异步电动机起动、制动和调速控制、常用机床和交流桥式起重机的电气控制;为了加强对学生的动手能力的培养,还编排了三相变压器连接组实验、三相异步电动机负载实验、串励直流电动机实验、三相异步电动机正反转控制实验、三相异步电动机降压起动控制实验、绕线式异步电动机起动与调速控制实验。

本书适用于中等职业教育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使用。同时对于工程技术人员来说也是一本很好的自学教材和参考书。

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. —北京:电子工业出版社,2002.8

中等职业学校电子信息类教材·电气运行与控制专业

ISBN 7-5053-7957-7

I. 电… II. 程… III. ①电机—电力传动—专业学校—教材②电机—控制—专业学校—教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 063583 号

责任编辑:陈晓明 特约编辑:高文勇

印 刷:北京李史山胶印厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:12.25 字数:314千字

版 次:2002年8月第1版 2002年8月第1次印刷

印 数:5000册 定价:16.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,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

前 言

为了配合“电气运行与控制教材编审委员会”专业教材改革和专业建设的需要，由电子工业出版社组织编写该专业系列教材，本书为该系列教材之一。本教材充分考虑到电气运行与控制对电机和电气控制内容的要求，力求突出针对性、实用性和先进性。在教材编写方法上由简到繁，深入浅出，主次分明，详略得当，并充分体现系列教材的特色，与该专业其他9本专业教材从内容、形式到结构，都能够有机地结合在一起。

本书从应用的角度，详实地介绍了电机技术、电气控制技术两部分既有联系，又相对独立的内容。它包括：变压器，三相异步电动机，直流电动机，控制电机，常用低压电器，继电器-接触器控制基本环节，三相异步电动机起动、制动和调速控制，常用机床和交流桥式起重机的电气控制；为了加强对学生的动手能力的培养，还编排了三相变压器连接组实验，三相异步电动机负载实验，串励直流电动机实验，三相异步电动机正反转控制实验，三相异步电动机降压起动控制实验，绕线式异步电动机起动与调速控制实验。在重点分析基本技术与应用问题的基础上，注重对学生分析问题和解决问题能力的培养，强调基本原理以“必需”、“够用”为尺度，强化基本技能的培养和训练，使读者通过阅读本教材能掌握基本分析方法，学会基本技能。本教材的参考学时为108，可根据具体情况适度增、删相关内容。建议学时方案如下：

学时分配建议

序 号	课 程 内 容	学 时 数			
		合计	讲授	实验	机动
1	变压器	10	8	2	
2	三相笼型异步电动机	12	10	2	
3	直流电机	12	10	2	
4	控制电机	6	6		
5	常用低压电器	10	10		
6	继电器-接触器控制基本环节	16	10	6	
7	三相异步电动机的起动、制动和调速控制	8	8		
8	常用机床电气控制	16	16		
9	交流桥式起重机电气控制	8	8	4	
10	实验				
	机 动	6			6
	总 计	108	86	16	6

本书适用于中等职业教育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使用。同时对于工程技术人员来说也是一本很好的自学教材和参考书。

本书编写之前，电子工业出版社在杭州召开了大纲研讨会，会上“电气运行与控制专

业教材编审委员会”的各位专家对该书及该系列教材的深度、广度及相互衔接等问题进行了详细的讨论，并形成如下共识：

1. 为适应中等职业教育的要求，针对中职电类以及和电类联系较密切专业的需要，对教材内容重新定位，拓宽知识面，增加实践性内容。

2. 以《中华人民共和国职业技能鉴定规范》中的中、高级维修电工鉴定内容为依据，坚持“考什么，教什么”为原则，内容覆盖工种《规范》范围，是对《规范》的细化。

3. 在编写上依照中、高级维修电工（相对更加注重中级维修电工）所必须的知识要求、技能要求和工作实例为准绳，在保持知识连贯性的基础上，着眼于技能操作，力求浓缩精炼，突出针对性、典型性和应用性。

4. 本书编写中按照教育部颁布的《电气运行与控制专业教学指导方案》内容，使教材更加规范，更加符合当前中等职业教育的要求。

本书由安徽省轻工业学校程周任主编，并编写第 6、7、8、9 章，实验及全书习题；安徽省轻工业学校李治国编写第 1、3、4 章；常州轻工业学校姚庆文编写第 5 章；安徽省轻工业学校孙忠献编写第 2 章。全书由程周统稿。

本书由合肥工业大学马红杰副教授任主审，主审以严谨的科学态度和高度负责的精神，认真读书稿，提出了许多修改意见；在“电气运行与控制专业”系列教材编写大纲研讨会上，张涛、姚锡禄、饶庆和、吴国经、荣俊昌对本书编写提出大量建设性意见，在此一并向他们表示衷心的感谢。

因编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请使用本书的广大读者批评指正。

编者

2002 年 5 月

目 录

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	(4)
1.2.2 变压器的负载运行	(6)
1.2.3 变压器的运行特性	(7)
1.3 三相变压器	(8)
1.3.1 三相变压器的连接组	(8)
1.3.2 三相变压器的并联	(10)
1.4 其他用途的变压器	(11)
1.4.1 调压变压器	(11)
1.4.2 仪用互感器	(12)
1.4.3 电焊变压器	(13)
习题 1	(14)
第 2 章 三相异步电动机	(16)
2.1 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 三相异步电动机的基本结构与类型	(18)
2.1.3 异步电动机的额定值与产品系列	(19)
2.2 三相异步电动机的运行原理	(20)
2.2.1 三相异步电动机的空载运行	(20)
2.2.2 三相异步电动机的负载运行	(21)
2.2.3 三相异步电动机的等效电路	(22)
2.2.4 三相异步电动机的功率与转矩	(24)
2.3 异步电动机的运行特性	(25)
2.3.1 异步电动机的机械特性	(25)
2.3.2 异步电动机的工作特性	(27)
2.4 三相异步电动机的起动	(28)
2.4.1 笼型异步电机的起动	(28)
2.4.2 绕线式异步电机的起动	(31)
2.5 三相异步电动机的调速	(33)
2.5.1 变极调速	(33)

2.5.2	变频调速	(35)
2.5.3	变转差率调速	(36)
2.6	三相异步电动机的制动	(37)
2.6.1	反接制动	(37)
2.6.2	回馈制动	(38)
2.6.3	能耗制动	(39)
2.7	单相异步电动机	(40)
2.7.1	单相电机工作原理与机械特性	(40)
3.7.2	单相异步电动机的起动类型	(42)
	习题 2	(43)
第 3 章	直流电机	(45)
3.1	直流电机的工作原理、结构及励磁方式	(45)
3.1.1	直流电机的工作原理	(45)
3.1.2	直流电机的基本结构	(46)
3.1.3	直流电机的励磁方式	(48)
3.1.4	直流电机的铭牌数据及系列	(50)
3.2	直流电机的电枢绕组	(51)
3.2.1	电枢绕组	(51)
3.2.2	电枢绕组的基本形式	(52)
3.3	直流电机的磁场、电磁转矩	(53)
3.3.1	直流电机的磁场	(53)
3.3.2	电枢的感应电动势和电磁转矩	(55)
3.4	直流电动机的工作特性	(56)
3.4.1	他励(并励)电动机的工作特性	(56)
3.4.2	串励电动机的工作特性	(57)
3.5	直流电动机的机械特性	(57)
3.5.1	他励电动机的机械特性	(57)
3.5.2	电动机的稳定运行条件	(59)
3.6	他励直流电动机的起动与反转	(60)
3.6.1	起动条件	(60)
3.6.2	起动方法	(60)
3.6.3	反转	(61)
3.7	他励直流电动机的调速	(61)
3.7.1	电枢串电阻调速	(62)
3.7.2	弱磁调速	(62)
3.7.3	降压调速	(63)
3.8	他励直流电动机的电气制动	(63)
3.8.1	能耗制动	(64)
3.8.2	反接制动	(65)
3.8.2	回馈制动(再生制动)	(66)

习题3	(66)
第4章 控制电机	(68)
4.1 测速发电机	(68)
4.1.1 直流测速发电机	(68)
4.1.2 交流异步测速发电机	(69)
4.2 伺服电动机	(70)
4.2.1 直流伺服电动机	(70)
4.2.2 交流伺服电动机	(70)
4.3 直流力矩电动机	(71)
4.3.1 直流力矩电动机的结构和原理	(71)
4.3.2 直流力矩电动机的特点	(72)
4.4 自整角机	(73)
4.4.1 力矩式自整角机的工作原理	(73)
4.4.2 控制式自整角机的工作原理	(73)
4.5 步进电动机	(75)
4.5.1 单段反应式步进电动机	(75)
4.5.2 多段式步进电动机	(76)
4.6 旋转变压器	(78)
4.6.1 正、余弦旋转变压器	(78)
4.6.2 线性旋转变压器	(79)
习题4	(80)
第5章 常用低压电器	(81)
5.1 低压电器的基本知识	(81)
5.2 常用低压电器的结构及工作原理	(83)
5.2.1 刀开关	(83)
5.2.2 熔断器	(91)
5.2.3 按钮开关	(92)
5.2.4 接触器	(94)
5.2.5 继电器	(100)
5.2.6 行程开关	(111)
5.2.7 自动开关	(112)
习题5	(115)
第6章 继电器-接触器基本控制环节	(116)
6.1 电气图形符号和文字符号	(116)
6.1.1 电气图中的图形符号	(116)
6.1.2 电气图中的文字符号	(117)
6.2 电气图的分类与作用	(117)
6.2.1 电气原理图	(118)
6.2.2 电气安装图	(118)
6.2.3 电气互连图	(119)

6.3	点动与长动控制	(119)
6.3.1	点动控制线路	(119)
6.3.2	长动控制线路	(120)
6.3.3	长动与点动控制线路	(121)
6.4	正、反转控制	(122)
6.4.1	接触器互锁正、反转控制线路	(123)
6.4.2	按钮互锁正、反转控制线路	(123)
6.4.3	双重互锁正、反转控制线路	(124)
6.5	位置控制	(125)
6.5.1	限位断电控制线路	(125)
6.5.2	限位通电控制线路	(126)
6.5.3	自动往复循环控制线路	(126)
6.6	顺序和多点控制	(126)
6.6.1	顺序控制线路	(127)
6.6.2	多点控制线路	(127)
6.7	时间控制	(127)
6.7.1	通电型时间继电器控制线路	(127)
6.7.2	断电型时间继电器控制线路	(127)
	习题 6	(128)
第 7 章	三相异步电动机的起动、制动和调速控制	(129)
7.1	三相笼型异步电动机起动控制	(129)
7.1.1	全压起动控制线路	(129)
7.1.2	定子串电阻起动控制	(129)
7.1.3	星形-三角形起动控制	(130)
7.1.4	自耦变压器起动控制	(132)
7.1.5	延边三角形起动	(135)
7.2	绕线式异步电动机的起动控制	(136)
7.2.1	转子串电阻起动控制	(136)
7.2.2	转子串频敏变阻器起动控制	(138)
7.3	三相笼型异步电动机制动控制	(139)
7.3.1	反接制动控制线路	(139)
7.3.2	能耗制动控制线路	(140)
7.4	异步电动机调速控制	(141)
7.4.1	变极调速控制线路	(141)
7.4.2	变阻调速控制线路	(144)
	习题 7	(144)
第 8 章	常用机床的电气控制	(146)
8.1	普通车床电气控制	(146)
8.1.1	普通车床的主要结构与运动形式	(146)
8.1.2	C620 车床的电气控制	(147)

8.2 磨床的电气控制	(149)
8.2.1 平面磨床的主要结构与运动形式	(149)
8.2.2 磨床的拖动特点与控制要求	(149)
8.2.3 M7120 磨床的电气控制	(150)
8.3 摇臂钻床的电气控制	(153)
8.3.1 摇臂钻床的主要结构与运动形式	(154)
8.3.2 Z35 摇臂钻床的电气控制	(154)
8.3.3 主电路工作原理	(154)
8.4 铣床的电气控制	(157)
8.4.1 万能铣床的主要结构与运动形式	(158)
8.4.2 X62W 万能铣床的电气控制	(158)
习题 8	(163)
第 9 章 交流桥式起重机的电气控制	(164)
9.1 凸轮控制器	(164)
9.1.1 凸轮控制器的结构与工作原理	(164)
9.1.2 触点分合展开图	(165)
9.1.3 凸轮控制器型号意义	(165)
9.2 交流桥式起重机的结构及控制要求	(165)
9.2.1 交流桥式起重机的结构	(165)
9.2.2 桥式起重机对电气控制的要求	(165)
9.3 10t 桥式起重机	(166)
9.3.1 10t 桥式起重机线路基本情况	(166)
9.3.2 10t 桥式起重机控制小车工作情况	(166)
9.3.3 保护电路	(168)
习题 9	(168)
实验	(170)
实验 1 三相变压器连接组实验	(170)
实验 2 三相异步电动机负载实验	(172)
实验 3 串励直流电动机实验	(174)
实验 4 三相异步电动机正、反转控制实验	(178)
实验 5 三相异步电动机降压起动控制实验	(179)
实验 6 绕线式异步电动机起动与调速控制实验	(182)
参考书目	(184)

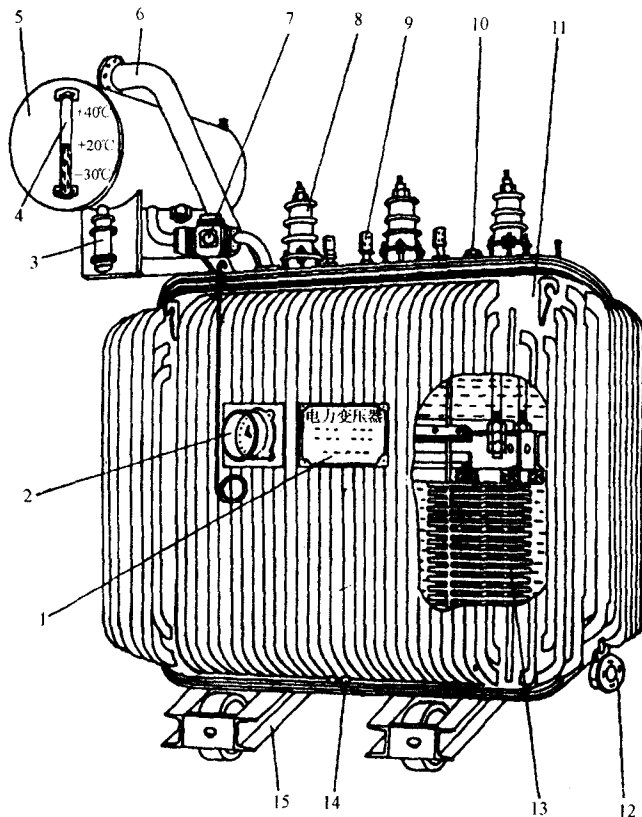
第1章 变 压 器

本章以普通双绕组电力变压器为研究对象，介绍单相变压器的主要结构、原理，着重在稳态对称运行条件下，对变压器空载运行和负载运行时的电磁关系进行分析。本章还对变压器运行时输出电压变化率和变压器效率做了介绍。三相变压器的每相情况与单相变压器一样，不须赘述，仅就其电路和并联运行加以介绍，最后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，此外还有油箱及其他附件，如图 1.1 所示。



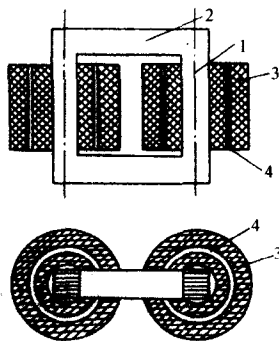
1—铭牌；2—讯号式温度计；3—吸湿器；4—油表；5—储油柜；6—安全气道；7—气体继电器；
8—高压套管；9—低压套管；10—分接开关；11—油箱；12—放油阀门；13—器身；14—接地极；15—小车

图 1.1 油浸式电力变压器

1. 铁心

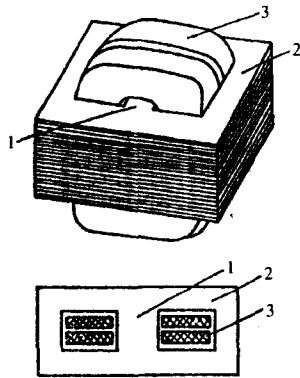
铁心是变压器中的磁路部分。为了减少铁心内的涡流损耗和磁滞损耗，铁心通常采用表面经绝缘处理的冷轧硅钢片叠装而成。硅钢片具有较优良的导磁性能和较低的损耗。冷轧硅钢片比热轧硅钢片更好，所以被广泛地采用。

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。



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

2. 绕组

绕组是变压器的电路部分，应具有较高的耐热、机械强度及良好的散热条件，以保证变压器的可靠运行和寿命。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。

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粘度，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（±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

变压器实质上是一个进行电能转换及传递的电磁装置，是静止的电气设备，利用电磁感应作用，从一个电路向另一个电路传递电能或传输信号，这两个电路具有频率相同的特点。

变压器的工作原理见图 1.4 所示。当一次绕组输入端接上交流电源时，产生交流电流，这一电流将产生交变磁通从铁心上通过，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应出电动势，在二次绕组上感应的电动势即作为负载的直接电源，负载若接上，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，并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 $e = -Nd\Phi/dt$ 。

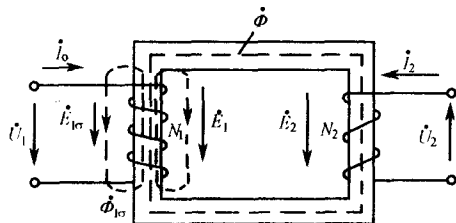


图 1.4 变压器空载运行原理图

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 ，二次绕组的匝数为 N_2 ，一次绕组接上电源电压 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，空载磁动势又叫做励磁磁动势，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 Φ_{10} 。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 Φ_{10} 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、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、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_{10} 。

设主磁通 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，漏磁通 $\Phi_{10} = \Phi_{10m} \sin \omega t$ ，代入 $e = -Nd\Phi/dt$ ，可得：

$$\dot{E}_1 = E_{1m} / \sqrt{2} = -j4.44 f_1 N_1 \dot{\Phi}_m \quad (1-1)$$

$$\dot{E}_2 = E_{2m} / \sqrt{2} = -j4.44 f_1 N_2 \dot{\Phi}_m \quad (1-2)$$

$$\dot{E}_{10} = E_{10m} / \sqrt{2} = -j4.44 f_1 N_1 \dot{\Phi}_{10m} \quad (1-3)$$

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 $U_{20} = E_2$ ，故

$$k = E_1/E_2 = N_1/N_2 \approx U_1/U_{20} \quad (1-4)$$

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。

在一般电力变压器中 $I_0 = (0.02 \sim 0.1)I_{1N}$ ，容量越大， 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。

4. 空载阻抗

(1) 一次绕组漏阻抗 Z_1 。变压器空载运行时，应考虑存在着极少量的仅与一次绕组相交链的漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ ，它也会在一次绕组中感应出漏磁电动势 $E_{1\sigma}$ 。为分析方便，我们引入一个称为漏电抗的参数。由于漏磁通磁路是线性的，所以漏磁通的大小与产生它的电流成正比。另外由式 (1-3) 可知，漏磁电动势的有效值也与漏磁通成正比，即

$$E_{1\sigma} \propto \Phi_{1\sigma} \propto I_0$$

再考虑到漏磁电动势 $E_{1\sigma}$ 在相位上也滞后于漏磁通 90° ，并且 $\Phi_{1\sigma}$ 与 \dot{i}_0 基本同相，因此 $E_{1\sigma}$ 滞后 \dot{i}_0 90° ，这样 $E_{1\sigma}$ 与 \dot{i}_0 之间表达式为

$$\dot{E}_{1\sigma} = -jX_1\dot{i}_0 \quad (1-5)$$

式中， X_1 为一次绕组的漏电抗。

利用一次绕组的漏电抗 X_1 这一参数，可以把漏磁电动势用电抗压降的形式来表示。从物理意义上说，漏电抗表征了漏磁通对电路的一种影响——电磁效应。

一次绕组电阻 r_1 与 X_1 构成一次绕组漏阻抗 $Z_1 = r_1 + jX_1$ 。

(2) 励磁阻抗 Z_m 。由于 Φ 是由空载电流 \dot{i}_0 产生的，它们之间的关系用磁化曲线表示。如果不计铁磁非线性及铁耗，则 Φ 与 \dot{i}_0 成正比，且两者同相位；因 \dot{E}_1 滞后 Φ 90° ，同样 \dot{E}_1 也滞后 \dot{i}_0 90° ，在数值上也正比于 \dot{i}_0 ， \dot{E}_1 与 \dot{i}_0 的比例系数，称为励磁电抗 X_m ，即

$$\dot{E}_1 = -jX_m\dot{i}_0 \quad (1-6)$$

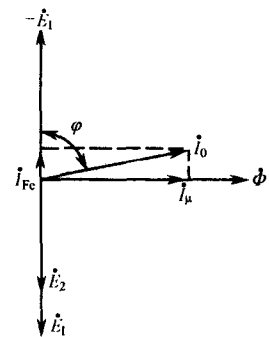


图 1.5 励磁电流与主磁通及其感应电动势相量图

可见，励磁电抗 X_m 是表征铁心磁化性能的一个参数，它的数值很大，是变压器重要参数之一。当电源电压保持在额定值左右时， X_m 近似不变。实际上，变压器磁路是非线性的， X_m 的数值随铁心饱和程度不同而改变。

另外，主磁通在铁心中还会产生磁滞损耗和涡流损耗，即铁耗。我们可用等效串联电阻 r_m 来表示 ($I_0^2 r_m = P_{Fe}$)， r_m 很小。由此， r_m 和 X_m 可组成励磁阻抗 $Z_m = r_m + jX_m$ 。故式 (1-6) 可近似为

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_0 Z_m \quad (1-7)$$

根据图 1.4 各量所规定的正方向，按基尔霍夫第二定律，列出单相变压器空载时的电动势平衡方程为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_0 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 \quad (1-8)$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (1-9)$$

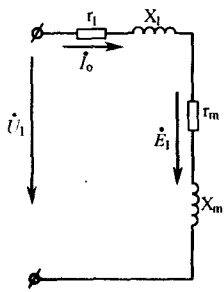


图 1.6 单相变压器空载等效电路图

根据空载电动势平衡方程式，可画出图 1.6 空载运行等效电路图，用于空载变压器的分析计算。

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 1.7 为变压器负载运行的原理示意图。

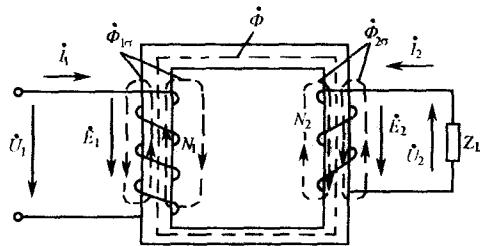


图 1.7 变压器负载运行原理图

负载运行时，二次绕组输出端接上负载 Z_L 在 \dot{E}_2 的作用下产生二次电流 \dot{I}_2 ，二次绕组则出现磁动势 $\dot{F}_2 = \dot{I}_2 N_2$ ，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 也要改变，打破了原来空载时的电磁平衡状态。其实，在实际的电力变压器中， Z_1 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) 可知主磁通 Φ 也就基本相同，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

$$\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1 \quad (1-10)$$

这就是变压器负载运行的磁动势平衡式，也适用空载 $\dot{I}_2 = 0, \dot{I}_1 = \dot{I}_0$ 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，这个增加量正好与二次绕组的磁动势 \dot{F}_2 大小相等，相位相反，完全抵消。 \dot{F}_1 由两个分量组成，一个分量是励磁磁

动势 $\dot{F}_0 = \dot{I}_0 N_1$ ，用来建立主磁通；另一个分量是 $-\dot{F}_2 = -\dot{I}_2 N_2$ ，用来平衡二次绕组磁动势，叫负载分量，随负载不同而变化。额定运行时， $I_0 \ll I_{1N}$ ， $F_0 \ll F_1$ ， \dot{F}_1 中主要的是负载分量。忽略 \dot{I}_0 可得一、二次电流关系式为

$$\dot{I}_1 \approx -\frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = -\frac{\dot{I}_2}{k} \quad (1-11)$$

变压器是将一种电压的电能不能转变成另一等级电压的电能的电气设备。由式(1-14)可知，负载电流增加，一次绕组上的电流也随之增加，这就意味着通过电磁感应作用，变压器的功率从一次绕组传递到了二次绕组。当然传递的过程中，变压器自身也消耗一小部分能量，所以输出功率小于输入功率。

电源输入功率 $P_1 = U_1 I_1 \cos \theta_1$ ，其中一部分消耗于一次绕组电阻 r_1 上的铜耗 $P_{Cu1} = I_1^2 r_1$ 和铁耗 $P_{Fe} = I_0^2 r_m$ ，其余绝大部分通过主磁通传递给二次绕组，这部分叫电磁功率 $P_M = E_2 I_2 \cos \theta_2$ ， θ_2 为 \dot{E}_2 与 \dot{I}_2 之间的相位差。电磁功率经过二次绕组上的铜耗 $P_{Cu2} = I_2^2 r_2$ ，剩下就是变压器的输出功率 $P_2 = U_2 I_2 \cos \theta_2$ 供负载使用。用功率平衡方程式表示如下：

$$P_1 = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Cu2} + P_2 = P_2 + \Sigma P \quad (1-12)$$

2. 电压平衡式

变压器的一、二次绕组磁动势除共同建立主磁通并感生电动势 \dot{E}_1 、 \dot{E}_2 之外，还各自产生一小部分仅与本绕组交链，且主要通过空气（或油）而闭合的漏磁通 $\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 、 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$ ，它们将在各自绕组上感应出漏磁电动势 $\dot{E}_{1\sigma}$ 和 $\dot{E}_{2\sigma}$ 。

根据图 1.7 所示的正方向，可分别列出一、二次绕组电路的电动势平衡方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 X_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (1-13)$$

若将较小的漏阻抗压降略去不计，则近似为 $\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 r_2 - j \dot{I}_2 X_2 = -\dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (1-14)$$

式中， $j \dot{I}_2 X_2$ 为二次绕组的漏抗压降，用来反映 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$ 对二次绕组的影响。

1.2.3 变压器的运行特性

变压器对负载来说是电源，所以要求其供电电压稳定，供电损耗小，效率高。即表征变压器运行性能的两个主要指标：一是二次绕组电压的变化率（调整率），二是效率。

1. 电压变化率和外特性

由于变压器一、二次绕组上有电阻和漏抗，负载时电流通过这些漏阻抗必然产生内部电压降，其二次绕组电压则随负载的变化而变化。

电压变化率是当一次绕组接在额定频率和额定电压的电网上，在给定负载功率因数下，二次绕组空载电压 U_{20} 与负载时二次绕组电压 U_2 的算术差和二次绕组额定电压之比值，用 $\Delta U\%$ 表示。它反映了电源电压的稳定性及电能的质量。

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}} \times 100\%$$

变压器的外特性是一次绕组为额定电压，负载功率因数一定时，二次绕组端电压 U_2 随二次绕组负载电流 I_2 变化的关系曲线，如图 1.8 所示。带纯电阻负载时，端电压下降较小；