



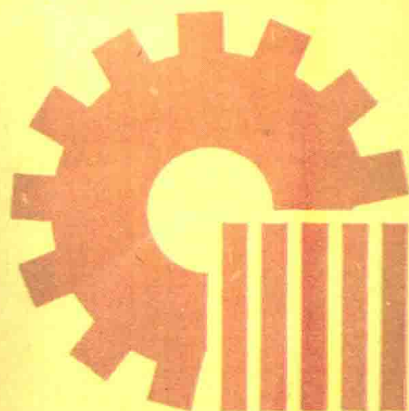
中央广播电视大学教材

电机与拖动

上册

DIAN JI YU
TUO DONG

周绍英 牛秀岩 编



中央广播电视大学出版社

电 机 与 拖 动

上 册

周绍英 牛秀岩 编

中央广播电视大学出版社

(京)新登字 163 号

图书在版编目(CIP)数据

电机与拖动 上册 / 周绍英 牛秀岩编 一北京: 中央广播电视大学出版社, 1994. 5

ISBN 7-304-01039-8

I. 电… II. 周… III. ①电机-电视大学-教材②电力拖动-电视大学-教材 IV. TM3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 06950 号

电 机 与 拖 动

上 册

周绍英 牛秀岩 编

中央广播电视大学出版社出版

社址: 北京西城区大木仓 39 号北门 邮编: 100032

北京联华印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

*

开本 787×1092 1/16 印张 15.75 千字 359

1994 年 2 月第 1 版 1994 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—26 000

定价 8.90 元

ISBN 7-304-01039-8/TM·24

主持教师：周远程
主 编：周绍英
编 者：牛秀岩

前 言

本书是为中央广播电视大学工业自动化专业编写的专业基础课教材,是根据中央广播电视大学“电机与拖动”课程教学大纲编写的。本书也可供大专院校自动化专业学生和从事自动化专业的技术人员参考。

全书分上、下两册,除绪论外共十章。

上册主要包括变压器、电力拖动系统动力学、直流电机原理、直流电动机的电力拖动、交流电机电枢绕组的感应电势和磁势及同步电动机等六章。应该指出的是,在介绍交流电机电枢绕组的感应电势和磁势之后,本应先讲异步电动机,再讲同步电动机。但是由于中央广播电视大学教学学时安排所限,只好将同步电动机一章放在上册。

下册包括异步电动机、三相异步电动机的电力拖动、电力拖动系统中电动机的选择、微控电机四章。

上述内容中以直流电动机及其拖动和异步电动机及其拖动为重点内容。

本书对基本原理着重物理概念的阐述。力求做到内容精练,深入浅出,联系实际,简化数学推导。每章都配有一定数量的例题、思考题及习题,便于学生自学。

本书由周绍英教授担任主编,其中第一、二、四、八、九章由周绍英教授编写;第三、五、六、七、十章由牛秀岩副教授编写;绪论由二人合编。

本书由清华大学戴忠达教授、中央广播电视大学王岩副教授、北京联合大学纺织工学院葛德玉副教授、北京建筑工程学院李惠昇副教授审定。戴忠达教授任主审。审定组对本书进行了认真审阅,并提出了很多修改意见,在此表示衷心的感谢。更对工作认真、细致的责任编辑沈桂芝老师表示敬意和谢意。

限于编者学识水平,书中缺点错误及不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

1993年8月

目 录

绪论	(1)
§ 0-1 电机拖动的作用	(1)
§ 0-2 课程的性质和任务	(2)
§ 0-3 电机理论中的基本电磁定律	(2)
第一章 变压器	(8)
内容提要	(8)
§ 1-1 变压器的用途、结构及铭牌数据	(8)
§ 1-2 变压器的空载运行	(13)
§ 1-3 变压器的负载运行	(19)
§ 1-4 变压器的参数测定	(27)
§ 1-5 变压器的标么值	(31)
§ 1-6 变压器的运行特性	(33)
§ 1-7 三相变压器	(37)
§ 1-8 变压器的并联运行	(46)
§ 1-9 其它用途的变压器	(51)
小结	(56)
思考题及习题	(57)
第二章 电力拖动系统的动力学	(61)
内容提要	(61)
§ 2-1 电力拖动系统的运动方程式	(61)
§ 2-2 多轴系统的简化	(64)
§ 2-3 传动机构的损耗和效率	(69)
§ 2-4 负载的转矩特性	(71)
小结	(75)
思考题及习题	(75)
第三章 直流电机原理	(78)
内容提要	(78)
§ 3-1 直流电机的工作原理和结构	(78)
§ 3-2 直流电机的电枢绕组	(88)
■ § 3-3 直流电机的励磁方式和空载磁场	(97)

§ 3-4 直流电机的电枢反应	(101)
§ 3-5 直流电机的能量变换	(105)
§ 3-6 他励直流电动机的工作特性	(112)
§ 3-7 串励、复励直流电动机的运行特性	(121)
§ 3-8 直流电机的换向	(124)
小结	(132)
思考题及习题	(133)
第四章 直流电动机的电力拖动	(135)
内容提要	(135)
§ 4-1 直流电动机机械特性的分类	(135)
§ 4-2 他励直流电动机的机械特性	(136)
§ 4-3 他励直流电动机的起动	(142)
§ 4-4 他励直流电动机的调速	(143)
§ 4-5 他励直流电动机的制动	(153)
§ 4-6 他励直流电动机的四象限运行	(162)
§ 4-7 电力拖动系统的过渡过程	(167)
小结	(179)
思考题及习题	(179)
第五章 交流电机电枢绕组的感应电势和磁势	(183)
内容提要	(183)
§ 5-1 概述	(183)
§ 5-2 旋转磁势的作图分析	(184)
§ 5-3 交流电机的三相绕组	(190)
§ 5-4 交流绕组的感应电势	(195)
§ 5-5 交流绕组的磁势	(200)
§ 5-6 单相脉动磁势的分解	(208)
附录一 短距系数和分布系数	(210)
附录二 谐波磁势	(215)
小结	(219)
思考题及习题	(221)
第六章 三相同步电动机	(223)
内容提要	(223)
§ 6-1 同步电动机的结构和工作原理	(223)
§ 6-2 同步电动机的电枢反应	(225)
§ 6-3 同步电动机的定子电压平衡方程式	(229)

§ 6-4 同步电动机的功角特性·····	(234)
§ 6-5 励磁调节和 V 形曲线·····	(237)
§ 6-6 同步电动机的起动·····	(239)
小结·····	(240)
思考题及习题·····	(241)
参考书目·····	(242)

绪 论

§ 0-1 电机拖动的作用

在工业企业中,各种生产机械为了完成各种工艺过程的要求,大多数都需要由原动机提供机械能。早期的机械能来源于水力和蒸汽。电能出现以后,由于电能具有变换、传输、分配、使用和控制都比较方便、经济,而且易于大量生产、集中管理、远距离传输和实现自动控制等优点,就由电能取代了水力和蒸汽。电能的产生、传输和分配均要借助于电机。电机属于机电能量转换装置。按照能量转换的方式不同,电机可以分为两大类,即将机械能转换成电能的发电机和将电能转换成机械能的电动机。此外,还有将某一电压等级的电能变换为另一电压等级电能的变压器。它们同属于动力设备。由于近代工业生产过程自动化水平的不断提高,又出现了用作自动化系统检测或控制元件的控制电机。用电机拖动生产机械的拖动方式,叫“电机拖动”或“电力拖动”。

生产的不断发展,对生产工艺也不断提出更高的要求。例如,要求加工精度高,调速范围广,快速起动、制动和反转等。这些要求均通过控制设备控制电机来实现,因此形成了由电动机、传动机构、生产机械、控制设备及电源等主要部分组成的电力拖动系统,如图 0-1 所示。其中电动

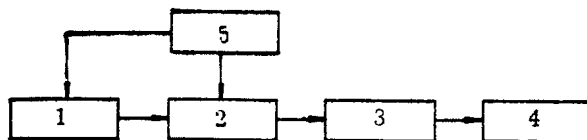


图 0-1 电力拖动系统的结构图

1—控制设备; 2—电动机; 3—传动机构; 4—生产机械; 5—电源

机是个机电能量转换设备,它把从电源输入的电能转换为生产机械所需要的机械能,或运行于发电状态,将生产机械的机械能转换成电能。电源,可利用发电机将机械能转变为电能,也可运用静止变流装置供电。为了经济地传输、分配电能,还需用变压器将某一电压等级的交流电转变成另一电压等级、同频率的电能,传输到用户的电源上。传动机构用来实现速度和运动方式的变换。

电机拖动广泛应用于各种工业企业的机械设备中,如机床、电铲、轧钢机、起重机、风机、水泵、纺织机械、造纸机等等。电机拖动在农业、交通运输业中的应用也日益增多。此外,在航运、航天、国防、文教、医疗、家用电器等各个领域,电机拖动的应用也十分普遍。

以电机为原动机已成为现代工业生产自动化与电气化的标志之一。随着电机拖动系统的不断完善、功率半导体器件的广泛应用、数控技术和电子计算机技术的发展,电机拖动系统的静

态和动态品质已有显著的提高，已能够满足生产工艺过程的要求。这对提高劳动生产率和产品质量、改善工人的劳动条件，都具有十分重要的意义。

§ 0-2 课程的性质和任务

本课程研究的主要对象是如图 0-1 所示的由电动机、传动机构和生产机械组成的电机拖动系统的基本理论问题。

在电机拖动系统中,电动机是其中的机电能量转换装置。本课程从使用电机观点出发,研究电机的基本结构、工作原理、内部电磁物理过程、功率关系和机械特性等问题,重点放在研究电动机起动、制动、调速三大问题上;系统地讨论电机拖动系统的静态和动态特性,为学生掌握本专业知识和学习后续课程打下必要的理论基础。本课程既具有很强的理论性,又具有一定的实践性,是工业自动化专业的一门重要的技术基础课,在本专业学习中占有重要的地位。后续的“半导体变流技术”、“自动控制原理”、“自动控制系统”、“近代交流调速”等课程和电子计算机等新技术在传动领域中的应用,都立足于改善和提高电机拖动系统的静态和动态特性。由此可见“电机与拖动”是工业自动化专业学生必须学好的一门课程。没有这个基础,后续课程的学习将会无的放矢,从而陷入盲目性。同时该课程又可以作为一门独立的技术应用课,直接为工农业生产服务。

§ 0-3 电机理论中的基本电磁定律

电机的理论分析是建立在全电流定律、电磁感应定律、电路定律和电磁力定律的基础上的。为了更好地理解电机原理,复习一下这些基本电磁定律是十分必要的。下面简要介绍一下上述定律的内容。

一、全电流定律

设空间有 N 根载流导体,环绕载流导体任取一磁通的闭合回路,如图 0-2 所示。令 H 表示沿该回路上各点切线方向的磁场强度,则全电流定律的积分形式可表示为

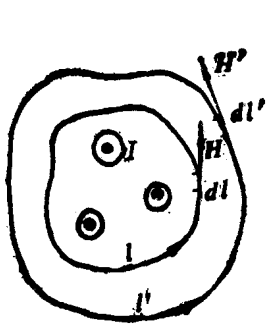


图 0-2 全电流定律的示意图

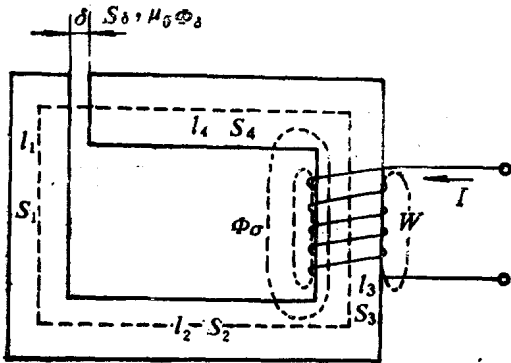


图 0-3 全电流定律的应用

$$\oint_l H dl = NI \quad (0-1)$$

式中 H ——沿该回路上各点切线方向的磁场强度分量；

I ——每根导体中的电流。电流的正负号这样确定，凡导体电流方向与积分路径方向符合右手螺旋关系，则电流为正，反之为负。

式 0-1 表明，在环绕载流导体的任一磁通闭合回路中，磁场强度 H 沿该回路的线积分，等于该闭合回路所包围的电流的代数和，所以称为全电流定律。上式还表明，该磁场强度沿闭合回路的线积分，其结果与积分路径无关。因此

$$\oint_l H dl = \oint_l H' dl' = NI \quad (0-2)$$

式中 NI 称为该磁路的磁动势，简称磁势。也就是该回路所包围的总电流量， $NI = F$ 。

全电流定律是电机和变压器磁路计算的基础。若磁路是由不同材料或不同长度和截面积の数段组成的（参见图 0-3），则全电流定律可表示为

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 + H_\delta \delta = \sum(Hl) = NI = F \quad (0-3)$$

式中 $H_1 l_1, H_2 l_2, \dots$ ——磁路各段的磁压降；

$l_1, l_2, \dots$ ——磁路工程计算的平均长度；

δ ——空气隙长度。

从物理学可知，磁场强度 H 与磁感应强度 B 及导磁系数 μ 的关系为

$$H = \frac{B}{\mu} \text{ (A/m)}$$

工程上常将磁感应强度 B 表示为单位面积的磁通量，称为磁通密度，简称磁密

$$B = \frac{\Phi}{S} \text{ (T)}$$

式中 Φ ——磁通量；

S ——磁路截面积。

这样， H 可由下式计算

$$H = \frac{\Phi}{\mu S}$$

代入式(0-3)，有

$$\frac{l_1}{\mu_1 S_1} \Phi_1 + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} \Phi_2 + \frac{l_3}{\mu_3 S_3} \Phi_3 + \frac{l_4}{\mu_4 S_4} \Phi_4 + \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta} \Phi_\delta = NI = F \quad (0-4)$$

类比电阻的计算式，可定义磁路的磁阻

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \text{ (A/Wb)}$$

所以磁路的磁阻取决于磁路的几何尺寸和所用材料的导磁系数 μ 。由于电机的磁路大都采用铁磁材料，铁心的导磁系数比空气的导磁系数大得多，所以其磁阻甚小。气隙虽小，但其磁阻很大，

通常约占磁路总磁阻的 70~80%，是磁路总磁阻的主要部分。

磁路中的磁通 Φ ，等于作用在磁路上的总磁动势 F 除以磁路的总磁阻，这就是磁路的欧姆定律。对电机磁路进行粗略估算时，可认为

$$R_{m\delta} \Phi \approx F \quad (0-5)$$

式中 Φ ——气隙中的磁通量；

$R_{m\delta}$ ——气隙磁阻。

$$R_{m\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta}$$

二、电磁感应定律

如图 0-4a 所示，当与线圈 AA' 交链的磁通 ϕ 发生变化时，在线圈中将产生与磁通对时间的变化率成比例的电势 e ，若线圈匝数为 W ，则

$$e = -W \frac{d\phi}{dt} \quad (0-6)$$

设 e 与 ϕ 的参考方向满足右手螺旋定则，参见图 0-4b，当 ϕ 增加时，线圈中感应电势的实际方向与所设正方向相反，具有反抗磁通变化的趋势，故上式应取负号。

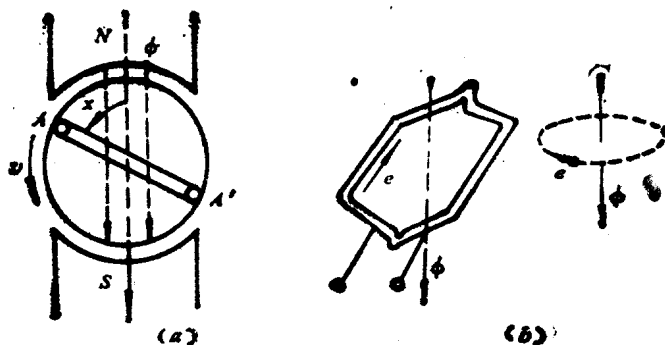


图 0-4 电磁感应定律

一般情况下，磁通 ϕ 是时间 t 和线圈对磁场相对位移 x 的函数，即 $\phi = f(t, x)$ 。因此，将式 (0-6) 展开，可得到

$$e = -W \frac{d\phi}{dt} = -W \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \right) \quad (0-7)$$

上式中 e 包括两部分，若 $\frac{dx}{dt} = 0$ ，则

$$e_b = -W \frac{\partial \phi}{\partial t} = -W \frac{d\phi}{dt} \quad (0-8)$$

e_b 称为变压器电势，一般变压器的工作原理就基于此，即线圈位置不动，而链绕线圈的磁通量对时间发生变化。

若式(0-7) 中 $\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$, 则

$$e_v = -W \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} = -W \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot v. \quad (0-9)$$

e_v 称为速度电势, 一般电机就是根据这个原理构成的, 即可使磁场的大小及分布不变, 仅靠磁场与线圈有相对位移来产生变化磁通和感应电势并进行能量变换。

为了方便, 对于速度电势常用计算一根导体在磁场中运动的感应电势的方法计算, 参见图 0-5a。单根导体 A 的感应电势为

$$e_v = B_x l v \quad (0-10)$$

式中 B_x ——导体所在位置的磁通密度;

l ——导体的有效长度;

v ——导体在垂直于磁力线方向上的运动速度。

这时感应电势的方向可依照右手定则确定: 用手掌对着 N 极磁通, 拇指表示导体相对于磁场的运动方向, 而四指表示感应电势的方向。如图 0-5b 所示。显然, B_x 、 v 、 e 三者空间方向应相互垂直。

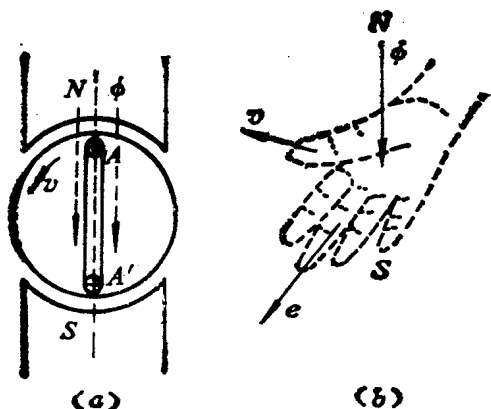


图 0-5 一根导体的感应电势

三、电路定律

电路定律系指基尔霍夫电流定律及电压定律, 即

$$\sum i = 0$$

$$\sum e = \sum u$$

电压定律表明: 任一电路中, 沿某一方向环绕回路一周时, 该回路内所有电势的代数和等于所有电压降的代数和。回路中各个电量的正负号可以这样来确定: 先规定电流、电势和电压的参考方向, 然后选定环绕回路一周的参考方向; 各电量的参考方向凡与环绕方向一致的则取正号, 反之则取负号。

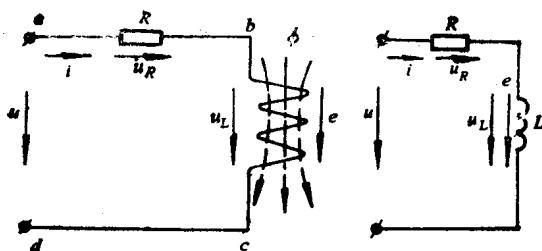


图 0-6 电路定律的应用

以图 0-6 所示电路为例,若各电量设定的参考方向如图,沿 $abcd a$ 环绕一周,则可列出回路方程

$$e = iR - u \quad (0-11)$$

或

$$u = iR - e = iR + L \frac{di}{dt} \quad (0-12)$$

式中 $e = -L \frac{di}{dt}$ 为电感线圈中的自感电势。可见,感应电势的参考方向应理解为从低电位指向高电位,即电压升高的方向;电压的参考方向应理解为从高电位指向低电位,即电压降低的方向。这一区别应特别注意。

四、电磁力定律

通以电流为 i 的导体在磁场中将受到电磁力的作用,若磁场与导体相互垂直(参见图 0-7a),则力 f 的大小为

$$f = B_x l i$$

式中 B_x ——导体所在位置的磁通密度;

l ——导体的有效长度;

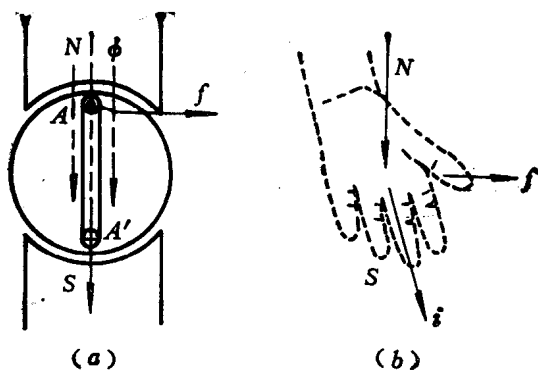


图 0-7 电磁力方向的确定

i ——导体中的电流强度。

电磁力的方向可由左手定则确定：用手掌对着 N 极磁通，四指表示电流的方向，而拇指则表示电磁力的方向，如图 0-7b 所示。显然， B_x 、 i 、 f 三者的空间方向应相互垂直。

第一章 变 压 器

内 容 提 要

本章以普通双绕组电力变压器为主要对象,介绍变压器的用途、结构、额定数据;变压器空载运行和负载运行中的电磁关系;变压器的参数测定方法;变压器的电压变化率及效率;变压器的联接组别和变压器的并联运行条件;并简要介绍自耦变压器及交流互感器。

本章只分析变压器的稳态运行情况,不考虑运行情况突变所产生的过渡过程。

§1-1 变压器的用途、结构及铭牌数据

一、变压器的用途

电力变压器的用途可综述为:经济地输送电能,合理地分配电能,安全地使用电能。

从发电厂到用户距离很远,电能的输送要求功率大,损耗小。当输送电的容量一定时,只有采用高压输电,才能减少线路损失。而发电机受绝缘等条件限制,发出的电压不可能很高,因此要升压后输送,用时再降压,才能经济合理,安全可靠。

由于各种原因,用户对电压的大小提出各种不同的要求,如 3 kV、6 kV、10 kV、36 V/24 V、380 V/220 V 等。但是发电机的额定电压多为 6.3 或 10.5 kV,经过升压,高压输电网的电压采用 110~330 kV。为了把从电力系统收到的高压电能,经过降压再分配到各用电厂房和车间去,就要在输配电过程中,进行多次电压变换,如图 1-1 所示。所以变压器的安全可靠运行,对电力系统有着相当重要的意义。进行电压变换和分配所用的变压器的安装容量是发电机容量的 5~8 倍。

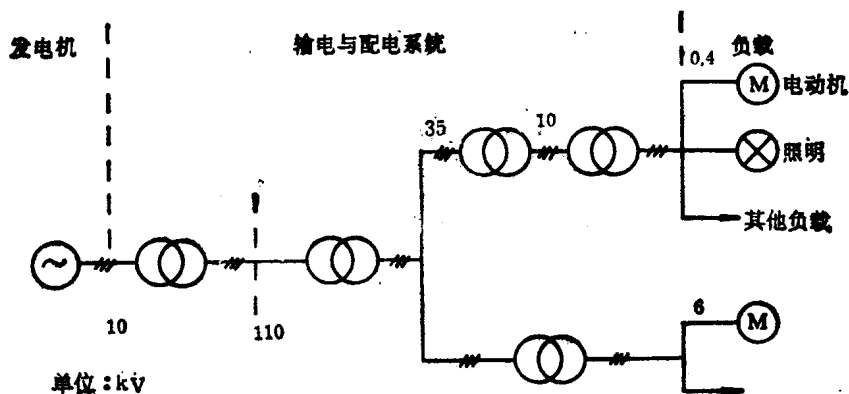


图 1-1 电力系统示意图

在安全使用电能方面,变压器所起的作用是不言而喻的。

可见,变压器就是一种通过电磁耦合关系,将一种等级的电压转换成同一频率的另一种等级电压的静止设备。

二、变压器的结构

变压器是通过电磁耦合关系传递电能的设备,因此铁心和绕组是其主要部分,二者装配到一起称为变压器的器身。器身如果放置在充满变压器油的油箱内,则称为油浸式变压器,其示意图如图 1-2 所示。这是最常见的一种电力变压器。

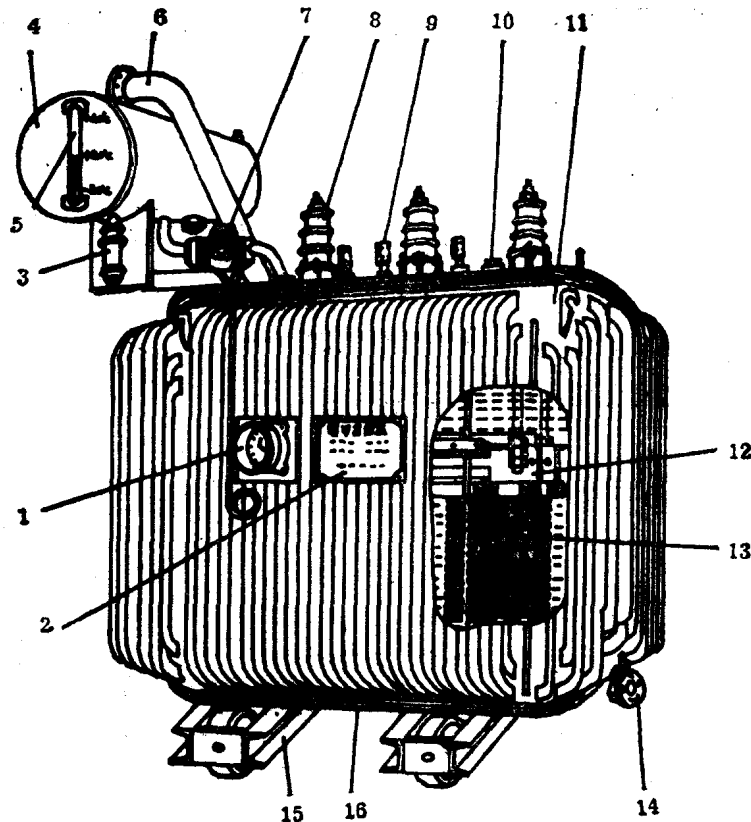


图 1-2 油浸式电力变压器

- 1—信号式温度计; 2—铭牌; 3—吸湿器; 4—储油柜; 5—油表; 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—
铁心; 13—绕组及绝缘; 14—放油阀门; 15—小车; 16—地线

变压器按相数有单相、三相和多相之分。电力变压器多为三相变压器,而且多用双绕组。当需要将三种电压等级的电网连接在一起时,才应用三绕组变压器。单相双绕组和三相双绕组变压器的铁心与绕组如图 1-3 及图 1-4 所示。

铁心是变压器的主磁路,其中通过交变的磁通。为了提高磁路的导磁性能和降低铁心的磁滞及涡流损耗,铁心通常用厚 0.35 mm 或 0.5mm 且表面涂有绝缘漆的硅钢片叠制而成。铁心由

• • •