



职工中等专业学校教材

成都水力发电学校 谈代秀 主编

电机与电力拖动



职工中等专业学校教材
电机与电力拖动
成都水力发电学校 谈代秀 主编

水利电力出版社出版、发行
(北京三里河路8号)

昌平建华印刷厂印刷

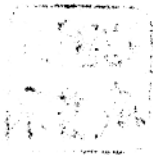
787×1092毫米 16开本 18.25印张 437千字
1989年12月第一版 1989年12月北京第一次印刷
印数0001—7200册

ISBN 7-120-00993-1/TM·312
定价 4.80元

内 容 提 要

全书共分六篇二十五章。主要内容是变压器,交流电机的绕组、电势和磁势,异步电动机及电力拖动,同步电机,直流电动机及电力拖动,电力拖动系统中电动机的选择等。

本书是职工中专和函授中专“用电管理专业”的通用教材,也可作普通中专“用电管理专业”和“工业电气自动化专业”的教材,还可供有关技术人员参考。



前 言

为了提高水利电力系统职工的技术水平,使水利电力职工中等专业学校的教学工作走向正规化、系统化,我司统一组织编写了这套水利电力职工中专教材。这套教材是根据我司1985年制定的《水利电力系统成人中专教学计划及教学大纲》,由水利电力系统内各职工中等专业学校和普通中专学校中有经验的教师分工编写的。在编写过程中,力求在保证理论教育的系统性、完整性的同时,密切联系生产实际,深入浅出,突出水利电力职工教育的特点。

水利电力职工中专教材分基础课及专业课两大部分,包括发电厂及电力系统、输配电工程、用电管理、电厂热动力装置、电厂热工测量及自动化、水工建筑、水电工程施工、水电站动力设备、陆地水文、工业与民用建筑、经济管理等11个专业,共约120种教材。

《电机与电力拖动》系用电管理专业的专业课教材之一,全书共六篇二十五章,由成都水力发电学校谈代秀主编,除第五篇直流电机部分由刘润莲编写外,其它各篇均由谈代秀编写;全书由西安电力学校赖松年审稿。编写过程中得到了湖北省电力学校候经枢和东方电机厂、成都电机厂等有关同志的热情帮助。

由于编写时间仓促,教材中错误难免,恳请读者批评指正。

水利电力部教育司

1988年4月1日

目 录

前 言

绪 论 1

第一篇 变 压 器

第一章 变压器的基本工作原理及结构 6

第一节 变压器的基本工作原理及分类 6

第二节 变压器的主要结构 7

第三节 变压器在电力系统中的作用 12

第四节 变压器的铭牌 13

第五节 小结 14

第二章 单相变压器的空载运行 16

第一节 空载运行时的电势平衡及变比 16

第二节 空载电流及空载损耗 20

第三节 空载时的等值电路及相量图 21

第四节 空载试验 23

第五节 小结 25

第三章 单相变压器的负载运行 27

第一节 负载运行时的磁势平衡和电势平衡 27

第二节 变压器的折算 29

第三节 变压器的等值电路及相量图 30

第四节 变压器的负载(短路)试验 33

第五节 变压器参数的标么值 35

第六节 变压器的运行性能 38

第七节 小结 43

第四章 三相变压器 46

第一节 三相变压器的磁路系统 46

第二节 三相变压器绕组的连接方法及连接组别 47

第三节 变压器连接组别的实验测定 50

第四节 三相变压器空载运行时的电势波形 51

第五节 小结 54

第五章 变压器的并联运行 57

第一节 变压器并联运行的条件 57

第二节 变比不等时的并联运行 58

第三节	阻抗电压标么值不等时的并联运行	59
第四节	联结组别不同时的并联运行	60
第五节	小结	61
第六章	其它变压器	63
第一节	三绕组变压器	63
第二节	自耦变压器	65
第三节	仪用互感器	68
第四节	电焊变压器	71
第五节	小结	72
第七章	变压器的过渡过程	74
第一节	变压器空载合闸时的瞬变过程	74
第二节	变压器副边突然短路时的瞬变过程	76
第三节	小结	78

第二篇 交流电机的绕组、电势和磁势

第八章	交流电机的绕组和电势	80
第一节	交流绕组的构成原则和分类	80
第二节	槽电势星形图	82
第三节	三相双层迭绕组	82
第四节	三相双层波绕组	85
第五节	分数槽绕组简介	88
第六节	交流绕组的电势	88
第七节	定子绕组始末端的判断方法	92
第八节	小结	93
第九章	交流电机绕组的磁势	95
第一节	单相交流绕组的磁势——脉动磁势	95
第二节	三相绕组的磁势——旋转磁势	99
第三节	小结	102

第三篇 异步电动机及电力拖动

第十章	三相异步电动机的结构及工作原理	104
第一节	异步电动机的用途	104
第二节	异步电动机的分类及主要结构	105
第三节	异步电动机的工作原理	108
第四节	异步电动机的铭牌及额定值	110
第五节	国产三相异步电动机的常见产品	112
第六节	小结	114

第十一章	三相异步电动机的运行原理	115
第一节	三相异步电动机的空载运行	115
第二节	三相异步电动机的负载运行	117
第三节	折算	122
第四节	等值电路及相量图	124
第五节	异步电动机的功率及转矩平衡方程式	126
第六节	异步电动机的电磁转矩	128
第七节	异步电动机的机械特性	129
第八节	异步电动机的工作特性	133
第九节	小结	135
第十二章	三相异步电动机的电力拖动	139
第一节	异步电动机的起动性能	139
第二节	鼠笼式异步电动机的起动	140
第三节	绕线式异步电动机的起动	147
第四节	深槽式和双鼠笼式异步电动机	151
第五节	鼠笼式异步电动机的调速	153
第六节	绕线式异步电动机的调速	157
第七节	电磁调速异步电动机	158
第八节	异步电动机的制动方法	160
第九节	小结	162
第十三章	三相异步电动机的控制电路	165
第一节	控制电路中的主要控制元件	165
第二节	三相异步电动机的控制电路	170
第三节	小结	176
第十四章	异步电动机的非正常运行	178
第一节	异步电动机在非额定电压下的运行	178
第二节	异步电动机在非额定频率下的运行	179
第三节	小结	179
第十五章	其它异步电动机	181
第一节	单相异步电动机	181
第二节	移相器	185
第三节	感应调压器	186
第四节	小结	187
 第四篇 同 步 电 机		
第十六章	同步发电机	188
第一节	同步发电机的基本结构及分类	188

第二节	同步发电机的工作原理	190
第三节	同步发电机的电枢反应	191
第四节	漏抗和同步电抗	195
第五节	隐极机的电压方程式及相量图	197
第六节	同步发电机的并联运行	198
第七节	功角特性及有功功率调节	202
第八节	无功功率调节及V形曲线	204
第九节	小结	206
第十七章	同步电动机和同步调相机	208
第一节	同步电动机的工作原理	208
第二节	同步电动机的电压方程式及相量图	208
第三节	同步电动机的功率因数特性	210
第四节	同步调相机	212
第五节	同步电动机的起动	215
第六节	小结	217

第五篇 直流电动机及电力拖动

第十八章	直流电机的工作原理及结构	219
第一节	直流电机的工作原理	219
第二节	直流电机结构简介	220
第三节	铭牌	223
第四节	励磁方式	223
第五节	小结	224
第十九章	电枢绕组和电枢电势	225
第一节	直流电枢绕组的一般知识	225
第二节	单迭绕组	226
第三节	单波绕组	228
第四节	电枢电势的计算公式	230
第五节	小结	231
第二十章	电枢反应	232
第一节	主磁场与电枢磁场	232
第二节	电枢反应	233
第三节	小结	235
第二十一章	换向	236
第一节	换向的基本概念	236
第二节	改善换向的方法	238
第三节	环火及补偿绕组	239

第四节 小结	240
第二十二章 直流发电机	241
第一节 并励发电机的自励建压过程	241
第二节 直流电机的基本方程	242
第三节 直流发电机的运行特性	243
第四节 小结	246
第二十三章 直流电动机及电力拖动	248
第一节 直流电机的可逆原理	248
第二节 直流电动机的基本方程式	249
第三节 直流电动机的机械特性	249
第四节 电力拖动机组稳定运行的条件	251
第五节 并励直流电动机的起动	252
第六节 并励直流电动机的调速	253
第七节 直流电动机的制动	256
第八节 串励直流电动机	257
第九节 小结	258
第六篇 电力拖动系统中电动机的选择	
第二十四章 电动机的发热与冷却	260
第一节 电机的发热及冷却规律	260
第二节 电机的绝缘材料等级和允许温升	262
第二十五章 电动机的选择	265
第一节 选择电动机容量的基本原则及电动机的工作方式	265
第二节 连续工作制电动机容量的选择	267
第三节 短时工作制电动机容量的选择	271
第四节 断续周期工作制电动机容量的选择	272
第五节 选择电动机功率的统计法	274
第六节 电动机种类、电压、转速和结构型式的选择	275
第七节 小结	277

绪 论

一、电机在国民经济中的地位 和作用

电能是现代最主要的能源,电机是与电能生产、传输和使用有关的能量转换的机器。发电机是电能的电源。电动机不仅是工业、农业、交通运输事业中的原动机,而且在国防、文教、医疗以及日常生活中,得到了愈来愈广泛的应用。

在电力系统中,发电机和变压器是发电厂的主要动力设备。例如将水力、热力、风力、太阳能、核能等转换成电能,都要使用发电机。为了经济地传输电能,需要使用升压变压器;为了安全和降低用电设备成本,需要使用降压变压器。

在机械、冶金、石油、煤炭、化学以及其它各种工业企业中,都使用电动机作为原动机。如机床、电铲、轧钢机、吊车、鼓风机、压缩机、抽水机、搅拌机、造纸机等,都采用电动机拖动。一个现代化的大型工厂,需要几百台至几千台的电动机。

随着农业机械化的发展,农业上也广泛使用电动机,如电力排灌、脱粒、碾米、粉碎等,都使用电动机来拖动。

随着城市交通运输和电气铁道的发展,需要很多具有良好起动性能和调速性能的牵引电动机。在航空和航运事业中,需要很多具有特殊要求的航空电机和船用电动机。

在军事国防和各种自动控制系统中,如雷达、航空、无线电、计算技术和航天技术等,需要大量的控制电机作为自动化系统中的元件。

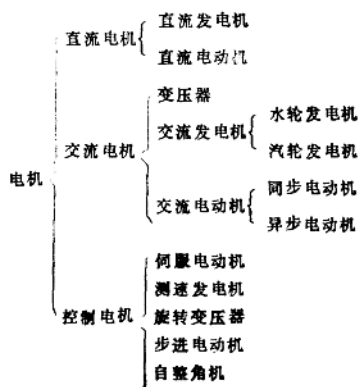
综上所述,发电机是电能的电源,变压器是大容量、远距离输电不可缺少的重要设备,电动机是实现工业、农业、交通运输机械化、自动化的原动机。所以电机对祖国的四化建设有着重要的作用,与国民经济及科学技术的发展有着密切的关系。

二、电机的分类

电机是一种能量转换的机器,其分类方法很多,按其功能来看,可分为:

- (1) 发电机——将机械能转变成电能;
- (2) 电动机——将电能转变成机械能;
- (3) 变压器——升高或降低电压;
- (4) 控制电机——作为自动化系统中的一个元件,完成信息的某种处理。

发电机和电动机是电机的两种运行方式,它们本身是可逆的。电机的分类可归纳如下:



三、我国电机工业发展概况

解放前,我国电机制造工业非常落后,生产的发电机单机容量在200kW以下,电动机容量不超过132kW(180马力),变压器不超过2000kVA,汽轮及水轮发电机组就从未生产过。

解放后,我国电机制造工业的发展速度是极为迅速的。1955年制成10000kW水轮发电机,1956年制成12000kW汽轮发电机,1960年制成72500kW水轮发电机和50000kW氢冷、100000kW氢内冷汽轮发电机,1969年制成125000kW双水内冷水轮发电机,1972年制成300000kW双水内冷汽轮发电机和300000kW双水内冷水轮发电机,还制成了电压为330kV、容量为360000kVA变压器。目前,已制成320000kW水轮发电机和电压等级为500kV、容量为360000kVA变压器,还能生产600000kW大型汽轮发电机。此外,各种电机都有系列产品,并大量采用新材料、新工艺、新技术,不断生产出适应国民经济发展的新产品。

四、电力拖动的基本知识及发展概况

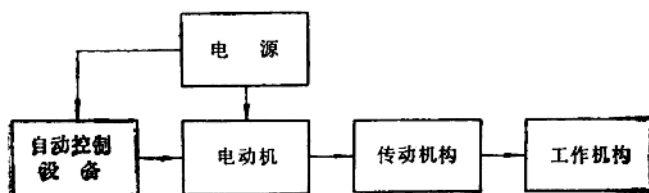
1. 电力拖动的基本知识

在现代工业中,为了实现各种生产工艺过程,需要使用各种各样的生产机械,拖动这些生产机械运动的电气机械装置,称为电力拖动装置。

电力拖动系统是由电动机拖动、通过传动机构带动生产机械运转的一个动力学整体。电力拖动系统主要由下面三部分组成:

- (1) 电动机——电力拖动的原动机,是将电能转换成机械能的部件;
- (2) 自动控制设备——控制电动机运转的各种控制电器,是间接控制工作机构运动的部件;
- (3) 电动机与工作机构之间的传动装置,如减速箱、皮带、联轴器等。

电力拖动的组成,如下所示:



拖动生产机械可以采用气动、液压拖动和电力拖动,但大多数生产机械都采用电力拖动,因为电力拖动具有如下优点:

- (1) 电能不仅能实现远距离输送,而且分配简单、检测方便、价格低廉、经济效益高。
- (2) 电动机与被拖动的机械连接简单、损耗小、效率高;
- (3) 电动机型式和种类很多,并具有不同的特性,可适应不同生产机械的需要,且

电力拖动的起动、制动、反转及调速控制简单,调节性能良好;

(4) 可实现远距离控制与自动调节,从而实现生产过程自动化。

由于电力拖动具有以上优点,因此电力拖动自动控制已成为现代工业生产和交通运输的高度电气化、自动化的基础与核心,对提高产品质量、改善工人劳动条件、提高生产率和经济效益,有着十分重大的意义。

2. 电力拖动自动控制发展概况

电力拖动自动控制经历了三个阶段:集中拖动→单电动机拖动→多电动机拖动。

19世纪末,在生产机械的拖动系统中,电动机逐渐代替了蒸汽机,出现了集中电力拖动。所谓集中电力拖动,就是用一台电动机拖动传动轴,再由传动轴经过皮带或绳索来分别拖动许多生产机械。这种拖动系统在传动过程中,能量损失大,不安全,又不能实现自动控制。随着生产实践的需要和发展,20世纪20年代,电力拖动方式由集中拖动发展为单电动机拖动。所谓单电动机拖动,就是一台电动机拖动一个生产机械。这种拖动方式可以充分利用电动机的调速性能,提高生产率,降低传送中的能量损失,并易于实现自动控制。随着生产的迅速发展,单电动机拖动已不能满足较复杂生产机械(大型机械和精密机械)对各种运动形式实现自动控制的要求,因此在30年代初出现了多电动机拖动方式。所谓多电动机拖动方式,就是用许多台电动机,分别拖动复杂机械的各个工作机构。这种多电动机拖动简化了机械结构,为机械的自动控制创造了良好的条件,更大地提高了生产率。目前常用的生产机械,都采用单电动机拖动或多电动机拖动。

在电力拖动方式发展过程中,电力拖动的控制方式,从手动控制逐步向自动控制方向发展。随着半导体器件与微电子技术的迅猛发展,近代又产生了程序控制、数字控制和计算机控制。电力拖动正向着用计算机控制生产过程自动化的方向迈进。

五、本课程的内容、任务和学习方法

(1) 内容:变压器;异步电动机及电力拖动;同步电机及电力拖动;直流电动机及电力拖动;电力拖动系统中电动机的选择。

(2) 任务:学习各种电动机的简单结构,工作原理,运行性能,交、直流电机的机械特性、起动及调速方法,培养学生分析问题、解决问题的能力和实验技能。

(3) 方法:电机学既是一门理论性很强的技术基础课,又具有专业课性质。在电机学中要应用理论解决实际问题,而实际问题往往是复杂的、综合的,因此在分析问题时,需要将其简化,找出主要矛盾,运用理论加以解决,这样得到的结果有一定的近似性,但能正确反映客观规律。根据电机学的性质和特点,学习方法应注意以下几点:

1) 抓住主要矛盾,略去次要因素,使问题简化。例如,忽略变压器原、副绕组的阻抗压降,则

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

2) 要抓住重点,即牢固掌握基本概念、基本理论、各物理量之间的相互关系及变化规律。

3) 要理论联系实际。一方面在讲电机的结构和绕组时,最好到电机制造厂结合实际

进行现场教学,了解各种电机结构部件的名称、作用及使用材料,并引导学生比较各种电机结构的异同,对各种电机建立初步的感性认识;另一方面,要重视实验和实习,它是理论联系实际的重要环节,不仅能巩固和验证所学的理论知识,而且能使学生在基本技能的训练,培养学生分析问题、解决实际问题的能力。

4)要培养学生综合分析问题的能力,引导学生对各种电机的结构、原理、性能进行比较,辨别异同,进行综合分析,以加深理解,帮助记忆。

六、研究电机常用的基本定律

1.全电流定律

设空间有几根载流导体,导体中的电流分别为 i_1 、 i_2 、 i_3 ……,则沿任何闭合路径 L ,磁场强度 $\vec{H}$ 的线积分 $\oint_L \vec{H} dL$,等于该闭合回路中所包围的导体电流的代数和,即

$$\oint_L \vec{H} dL = \sum i$$

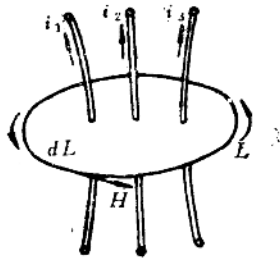


图 0-1 全电流定律

全电流定律在电机中应用很广,它是电机和变压器磁路计算的基础。全电流定律应用到电机和变压器中的多段磁路时,可改写成

$$\sum_1^n H_k L_k = \sum I = NI$$

式中 H_k ——第 k 段磁路的磁场强度, A/m;
 L_k ——第 k 段磁路的平均长度, m;
 NI ——磁势, 安匝。

2.电磁感应定律

设有一个匝数为 N 的线圈放在磁场中,当交链的线圈磁通 Φ 发生变化时,线圈就会产生感应电势,这种现象叫做电磁感应。如果感应电势的正方向与磁通的正方向规定得符合右螺旋定则,则感应电势为

$$e = - \frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

3.电路定律

在电路里,对任何一个回路,若沿某方向环绕一周,则回路内所有电势的代数和等于所有电压降的代数和,即

$$\sum e = \sum u$$

4.电磁力定律

通电导体在磁场中要受到力的作用。这种力是磁场和电流相互作用产生的,所以称为电磁力。若磁场与导体相互垂直,则作用在导体上的电磁力为

$$f = BLi$$

式中 B ——磁通密度, T;

L ——切割磁力线的导线长度，m；

i ——导体中的电流，A；

f ——作用在导体上的电磁力，N。

七、电机中常用的材料

电机是以磁场为媒介、利用电磁感应原理和电磁力定律实现能量转换的，所以在电机里有磁路和电路两部分。

为了减小电阻损耗 ($\Delta p = I^2 R$)，电路必须采用导电性能良好的导电材料，所以电机的绕组常用紫铜线或铝线绕制而成。

为了增加磁路的导磁性能，在激磁电流一定的情况下产生较强的磁场，电机和变压器的铁芯都采用导磁性能高的硅钢片迭成，磁路的其它部分也采用导磁性能较高的钢板和铸铁制成。

为了把带电部分分开以构成电路，在导体与导体之间，还隔有绝缘材料。绝缘材料要求介电强度高，耐热性能好。详细情况可见本书第二十四章第二节。

第一篇 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制成，其功能是将一种等级的电压、电流，变成频率相同的另一种等级的电压和电流，主要用途是改变电压，故称为变压器。

变压器的结构比交流电机简单，而它的基本理论和分析方法是研究交流电机特别是异步电动机的基础，所以先研究变压器，再论述交流电机。

变压器的种类很多，本篇主要讲述电力变压器，但其基本原理也适用于其它变压器。

第一章 变压器的基本工作原理及结构

本章首先阐述变压器的基本工作原理，然后介绍变压器的分类、主要结构及变压器在电力系统中的作用。

第一节 变压器的基本工作原理及分类

一、变压器的基本工作原理

变压器是利用电磁感应原理制成的，它的主要结构是一个铁芯和套在铁芯上的两个绕组。这两个绕组具有不同的匝数，且互相绝缘，如图1-1所示。两个绕组之间具有磁的耦合，但没有电的直接联系。

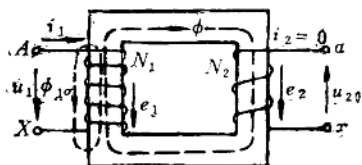
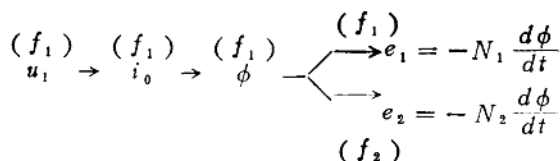


图 1-1 变压器的原理图

实际上，两个绕组套在同一铁芯柱上，以增大磁耦合作用。但为了画图简明起见，常把两个绕组分别套在铁芯的两边。通常一个绕组接电源，

称为原绕组或一次绕组；另一个绕组接负载，称为副绕组或二次绕组。

当原绕组接在交流电源 u_1 上时，原绕组中有交变电流 i 通过，并在铁芯中产生交变磁通 ϕ ，其频率与电源电压频率相同。铁芯中的交变磁通同时交链原、副绕组，根据电磁感应定律，分别原、副绕组中产生交变的感应电势 $e_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$ 和 $e_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$ 。如果副绕组接上负载，副绕组中便有电流流过，向负载供电，实现了电的传递。变压器工作时的电磁物理过程如下：



电→磁→电

变压器工作时，经历了由电变磁，再由磁变电的过程。原、副绕组的感应电势分别与原、副绕组匝数成正比，变压器就是利用原、副绕组匝数不等来实现变压的。

二、变压器的分类

变压器的种类很多，一般分为电力变压器和特种变压器两大类。电力变压器是电力系统中输配电的主要设备，容量从几十千伏安到几十万千伏安，电压等级从几百伏到五百千伏以上。

1. 电力变压器的分类

按用途分类：升压变压器；降压变压器；配电变压器。

按结构分类：双绕组变压器；三绕组变压器；多绕组变压器；自耦变压器。

按相数分类：单相变压器；三相变压器；多相变压器。

按冷却方式分类：干式空冷变压器；油浸自冷变压器；油浸风冷变压器；油浸水冷变压器；强迫油循环风冷变压器；强迫油循环水冷变压器。

按调压方式分类：无励磁调压变压器；有载调压变压器。

2. 特殊变压器的种类

特殊变压器是根据冶金、矿山、化工、交通等部门的具体要求设计制造的专用变压器。主要有以下几种：

- (1) 整流变压器，用于把交流电能变成直流电能；
- (2) 电炉变压器，用于把电能转换成热能；
- (3) 试验变压器，供高压试验用的变压器；
- (4) 矿用变压器，供矿井下配电用的变压器；
- (5) 船用变压器，供船舶用的变压器；
- (6) 中频变压器，供1000~8000Hz交流系统用的变压器。

随着电力事业的发展，电力系统中发电机容量不断增大，输电线电压等级不断提高，要求生产更大容量的变压器。为了加强电力系统的集中控制，提高供电质量，变压器正向着有载调压和有载自动调压的方向发展。

第二节 变压器的主要结构

从变压器的功能来看，铁芯和绕组是变压器的主要部件。铁芯和绕组称为器身。如果器身放在充满了变压器油的油箱里，这种变压器叫做油浸式变压器。目前油浸式变压器是

生产量最大、应用最广的一种电力变压器，它的外形结构如图1-2所示。

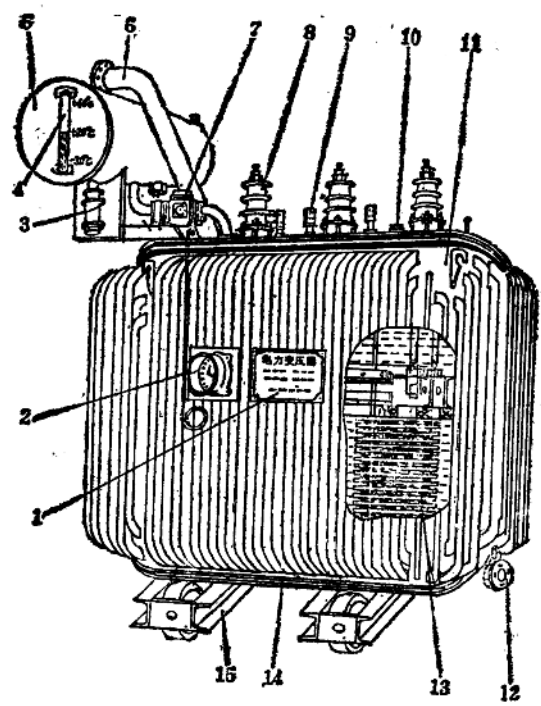


图 1-2 油浸式电力变压器

- 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—接地板，
15—小车

变压器主要由以下几部分组成：

变压器结构	器身	{ 铁芯、绕组 绝缘、分接开关
	油箱及附件	{ 油箱本体 附件 { 放油阀、小车 铭牌、接地螺栓
	冷却装置	{ 散热器 风扇
	保护装置	{ 储油柜、安全气道、吸湿器 净油器、油表、温度计、气体继电器
	出线装置	{ 高压瓷套管 低压瓷套管

下面重点说明油浸变压器的主要结构部件。

一、铁芯

变压器铁芯由铁芯柱和铁轭两部分组成，是变压器的磁路部分。铁芯的作用是导磁，以减小激磁电流。为了提高磁路的导磁性能和减小涡流及磁滞损耗，铁芯通常涂有绝缘漆