



普通高等教育“十二五”创新型规划教材

电机控制技术

DIANJI KONGZHI JISHU

主 编 韩建霞

普通高等教育“十二五”创新型规划教材

电机控制技术

主 编 韩建霞
副主编 王 峰
参 编 李俊瑞 姜翠丽
陈建强
主 审 殷 刚

内容简介

本书主要介绍直流电动机和三相异步交流电动机的基本理论和控制方法,包括结构、工作原理、特性和控制电路。同时书中也选编了和变压器有关的部分内容,来兼顾电力自动化专业的学生对变压器基础知识的需求。

全书以项目为纲,采用任务驱动的方式,使得教学更有针对性,也能很好地激发学生的学习积极性。书中涉及十二个项目,分别是:变压器极性判定,变压器参数测定,认识交、直流电机,直流电机改善换向方法选择,直流电动机机械特性绘制,三相异步电动机参数测定,三相异步电动机固有机械特性绘制,交、直流电动机的启动,交、直流电动机的调速,交直流电动机的制动,三相异步电动机综合控制电路,认识几种控制电机。

本书适合生产过程自动化和机电一体化等专业的高等院校的学生作为教材和参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

电机控制技术 / 韩建霞主编. —北京:北京理工大学出版社, 2012. 11
ISBN 978 - 7 - 5640 - 7161 - 5

I. ①电… II. ①韩… III. ①电机 - 控制系统 - 高等学校 - 教材
IV. ①TM301. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 310953 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (办公室) 68944990 (批销中心) 68911084 (读者服务部)

网 址 / [http://www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 15. 5

字 数 / 288 千字

责任编辑 / 陈莉华

版 次 / 2012 年 11 月第 1 版 2012 年 11 月第 1 次印刷

责任校对 / 杨 露

定 价 / 39. 00 元

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 本社负责调换



前言

本书把“电机学”“电力拖动基础”和“电气控制技术”三个部分的内容做了有效整合。在满足学时要求的前提下,编写时以学生够学够用为度,以项目为纲,围绕电机知识基础,展开电机控制方法的学习。力求做到内容精简、概念清晰、重点突出、易学易懂。

全书分三个部分 12 个项目。三个部分分别讲述变压器理论、交直流电机理论、交直流电机拖动及控制。参考学时建议 78 个,具体内容如下:

部分	项目	任务	学时/个
第一部分 变压器	项目一 变压器极性判定	任务一 变压器的工作原理及结构	4
		任务二 单相变压器同名端判定	
		任务三 三相变压器连接组别判定	6
	项目二 变压器参数测定	任务一 单向变压器的空载运行	
		任务二 单向变压器的负载运行	
		任务三 变压器参数测定实验	
第二部分 直流电机和交流电机	项目三 认识交、直流电机	任务一 认识直流电机	4
		任务二 认识交流电机	
	项目四 直流电机改善换向方法选择	任务一 直流电机的磁场	4
		任务二 直流电机的换向	
	项目五 直流电动机机械特性绘制	任务一 直流电动机的基本方程	6
		任务二 直流电动机的机械特性	
	项目六 三相异步电动机参数测定	任务一 三相异步电动机运行分析	4
		任务二 三相异步电动机参数测定实验	
	项目七 三相异步电动机固有机械特性绘制	任务一 三相异步电动机的基本方程	6
		任务二 三相异步电动机的机械特性	

续表

部分	项目	任务	学时分配
第三部分 电机拖动及控制	项目八 交、直流电动机的启动	任务一 直流电动机的启动方法	14
		任务二 三相异步电动机的启动方法	
		任务三 三相异步电动机启动控制线路	
	项目九 交、直流电动机的调速	任务一 直流电动机的调速方法	10
		任务二 三相异步电动机的调速方法	
		任务三 三相异步电动机的调速控制电路	
	项目十 交、直流电动机的制动	任务一 他励直流电动机的制动方法	10
		任务二 三相异步电动机的制动方法	
		任务三 三相异步电动机的制动控制电路	
	项目十一 三相异步电动机综合控制电路	任务一 三相异步电动机典型控制环节	6
		任务二 C650—2 卧式车床电气控制电路	
		任务三 M7130 型平面磨床电气控制电路	
	项目十二 认识几种控制电机	任务一 伺服电动机	4
		任务二 步进电动机	
		任务三 测速发电机	

参加本书编写的有韩建霞（项目三、八、九、十、十一）、王峰（项目六、七）、李俊瑞（项目一、二）、姜翠丽（绪论、项目十二）、陈建强（项目四、五）5 位老师。全书由韩建霞老师统稿，由殷刚老师审订。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。谢谢！



目 录

绪 论	1
-----------	---

第一部分 变压器

项目一 变压器极性判定	5
任务一 变压器的工作原理及结构	5
任务二 单相变压器同名端判定	14
任务三 三相变压器连接组别判定	16
思考与练习	19
项目二 变压器参数测定	20
任务一 单相变压器的空载运行	20
任务二 单相变压器的负载运行	27
任务三 变压器参数测定实验	35
思考与练习	38

第二部分 直流电机和交流电机

项目三 认识交、直流电机	39
任务一 认识直流电机	39
任务二 认识交流电机	54
思考与练习	69
项目四 直流电机改善换向方法选择	71
任务一 直流电机的磁场	71
任务二 直流电机的换向	72
思考与练习	75

项目五 直流电动机机械特性绘制	76
任务一 直流电动机的基本方程	76
任务二 直流电动机的机械特性	80
思考与练习	84
项目六 三相异步电动机参数测定	86
任务一 三相异步电动机运行分析	86
任务二 三相异步电动机参数测定实验	96
思考与练习	100
项目七 三相异步电动机固有机械特性绘制	101
任务一 三相异步电动机的基本方程	101
任务二 三相异步电动机的机械特性	106
思考与练习	113

第三部分 电机拖动及控制

项目八 交、直流电动机的启动	114
任务一 直流电动机的启动方法	114
任务二 三相异步电动机的启动方法	116
任务三 三相异步电动机启动控制线路	123
思考与练习	160
项目九 交、直流电动机的调速	162
任务一 直流电动机的调速方法	162
任务二 三相异步电动机的调速方法	169
任务三 三相异步电动机的调速控制电路	173
思考与练习	175
项目十 交、直流电动机的制动	176
任务一 他励直流电动机的制动方法	176
任务二 三相异步电动机的制动方法	182
任务三 三相异步电动机的制动控制电路	187
思考与练习	191
项目十一 三相异步电动机综合控制电路	192
任务一 三相异步电动机典型控制环节	192
任务二 C650—2 卧式车床电气控制电路	195
任务三 M7130 型平面磨床电气控制电路	200

思考与练习	205
项目十二 认识几种控制电机	207
任务一 伺服电动机	207
任务二 步进电动机	212
任务三 测速发电机	219
思考与练习	225
附录	226
附录 A 本书常用符号名称及含义	226
附录 B 电气图形符号和基本文字符号	230
参考文献	238

绪 论

一、电机控制技术概述

“电机控制技术”是一门实践性比较强的专业课。电机控制技术在现代工农业生产、交通运输、科学技术、信息传输以及日常生活等各个领域中的应用都十分广泛。

电机是一种利用电磁感应定律和电磁力定律，将能量或信号进行转换或变换的电磁机械装置。电机的品种繁多，按其功能用途可分为变压器、直流电机、交流电机和特殊电机，如图 0-1 所示。

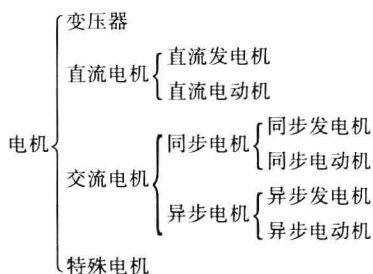


图 0-1 电机分类

电机在国民经济的诸多领域起着重要作用。在电力工业中，产生电能的发电机和对电能进行变换、传输与分配的变压器是电站和变电所的主要设备。在工业企业中，人们利用电动机把电能转换为机械能去拖动各种生产机械，从而满足生产工艺过程的要求。在交通运输业中，需要大量的牵引电动机。在电力排灌、播种、收割等农用机械中，都需要规格不同的电动机。在品种繁多的家用电器中，也离不开功能各异的小功率电动机。

用电动机作为原动机拖动生产机械运行的系统，称为电力拖动系统。电力拖动系统是机电设备中的一个重要组成部分。除小部分生产机械采用气动或液压拖动外，绝大多数的生产机械都采用电力拖动。为了让电动机能按照生产需要进行工作状态的变换，需要对电动机进行控制，如电动机的启动、制动、反转及调速等，完成这些功能的设备就称为控制设备。将控制设备如低压电器、主令电器等按一定规律连接起来的线路就称为电气控制线路。电气控制线路主要是完成对电动机的电气控制。

(一) 电机控制系统的组成

电机控制系统的组成见图 0-2。

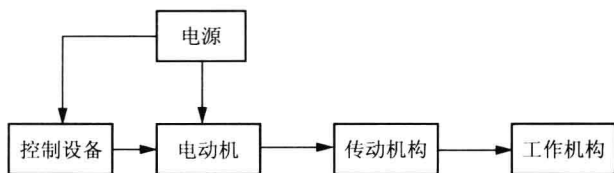


图 0-2 电机控制系统的组成

1. 电源

电源是电动机和控制设备的能源，分为交流电源和直流电源。

2. 电动机

电动机是生产机械的原动机，其作用是将电能转换成机械能。系统中电动机可以是直流电动机，也可以是交流电动机。

3. 控制设备

控制设备用来控制电动机的运转，由各种电动机、电器、自动化元件及工业控制计算机等组成。

4. 传动机构

传动机构是在电动机与生产机械的工作机构之间传动动力的装置，如减速箱、传动带、联轴器等。

(二) 电机控制系统的特点

1. 方便经济

电能的生产、变换、传输都比较经济，分配、检测和使用都比较方便。

2. 效率高

电机采用电气控制比传统的控制系统效率高，且容易实现。

3. 调节性能好

电机控制系统的类型很多，具有各种运行特性，可适应各种不同的生产机械的需求，控制简便迅速，能实现较理想的控制目的。

4. 易于实现生产过程的自动化

二、电气控制技术的发展状况

电动机运行性能的实现，是以电气控制技术为依托的。电气控制技术的发展

也经历了一个循序渐进的更新过程。

在控制方法上,从手动控制过渡到自动控制;在控制功能上,从简单到复杂;在操作上由笨重到轻巧;从控制原理上,由单一的有触点硬接线继电器控制系统转向以微处理器为中心的软件控制系统。新的控制理论和新型电器以及电子器件的出现,不断地推动着电气控制技术的继续发展。

生产机械拖动系统的初期,常以一台电动机拖动多台设备,或是一台机床的多个动作由同一台电动机拖动,相应的电气控制线路比较简单。随着生产机械功能增多、自动化程度的提高,其机械传动系统也越来越复杂,为了简化传动机构而出现了分散拖动形式,即各个运动机构分别由不同电动机拖动,这使电气控制线路进一步复杂化。此外,在生产过程中,对影响产品质量的各种参数都要求能自动调整,促使电气自动控制技术迅速向前发展,控制线路日趋完善。

生产机械拖动系统的初期,常用的控制电器有继电器、接触器等,用这些电器进行的控制称为继电器-接触器控制,这是一种有触点的控制方式。长期以来,继电器-接触器控制在控制设备中发挥了很大作用,直到今天,在一般工厂的控制设备中还占有很大比重。继电器-接触器控制虽然有价廉易学的特点,但是对于经常需要变换控制线路的设备来说,存在改接困难和周期长的缺点。为了生产需要和提高加工精度,人们开始研究容易改变顺序的可编程控制器。

在 20 世纪 60 年代出现了一种能够根据生产需要,方便地改变控制程序,而又远比电子计算机简单,价格低廉的自动化装置——顺序控制器,它能满足程序经常改变的控制要求,使控制系统具有较大的灵活性和通用性。由于它兼备了计算机控制和继电器控制两方面的优点,故目前在世界各国已作为一种标准化通用设备普遍应用于工业控制中。

在 20 世纪 50 年代出现了数控机床,它是一种具有广泛通用性的高效率自动化机床,综合了电子技术、检测技术、计算机技术、自动控制和机床结构设计等各个领域的最新技术成就。数控机床的出现,极大地提高了劳动生产率和产品加工质量,降低了劳动强度。目前仍在广泛使用,并且又发展为附带自动换刀、自适应等功能的复杂数控系列产品,称为加工中心。

上述各种先进控制设备的应用,促进了电气控制技术的发展。可以说,可编程控制器、机器人和数控机床已成为现代控制的三大支柱。

三、本课程的性质、主要内容、任务、要求和学习方法

“电机控制技术”在电气自动化、电力系统、机电一体化专业中是一门实践性比较强的专业核心课。本课程主要通过项目教学法,以每个任务为导向,分别介绍了变压器极性判定,直流电机改善换向方法选择,交、直流电动机机械特性

绘制，三相异步电动机参数测定，交、直流电动机的启动、调速、制动和三相异步电动机综合控制电路等共计 12 个项目的内容。

本课程的任务是使学生掌握电机的结构、原理、运行性能和试验方法以及电气控制的基本环节、控制方法。为学习后续可编程控制器等课程和今后的工作准备必要的基础知识，同时也有助于培养在电机控制技术方面分析和解决问题的能力。

“电机控制技术”是“电机拖动”和“电气控制技术”两部分内容的有机结合，它是在学习了“电工基础”等课程的基础上，通过讲授交、直流电机，变压器的基本理论，电力拖动的基本原理和继电器-接触器电气控制等知识，预期达到下列要求：

- (1) 熟悉直流电动机、变压器、三相异步电动机的基本结构和工作原理。
- (2) 掌握低压电器的用途、原理、图形符号，达到能正确使用和选用的目的。
- (3) 掌握直流电动机、三相异步电动机的机械特性、各种运转状态的基本理论以及电动机对应的基本电气控制线路，具有对一般电气控制线路独立分析的能力。
- (4) 具有设计和改进一般生产设备的电气控制的能力。

“电机控制技术”不仅有必要的理论叙述，还有综合性的工程实际问题，从分析一个问题开始，到设计出电气控制线路结束。在这个理论联系实际的过程中，学生切忌死记硬背，除了课堂领会教学内容，还要辅助实验、实训和适当习题，争取在学中做，在做中学，达到知识的融会贯通。

第一部分 变 压 器

项目一

变压器极性判定

变压器是一种静止的电气设备，它利用电磁感应原理将一种电压等级的交流电能转变成另一种电压等级的交流电能。变压器按用途一般分为电力变压器和特种变压器及仪用互感器（电压互感器和电流互感器）。电力变压器按冷却介质可分为油浸式和干式两种。

在电力系统中，电力变压器（以下简称变压器）是一个重要的设备。发电厂的发电机输出电压由于受发电机绝缘水平限制，通常为 6.3 kV、10.5 kV，最高不超过 20 kV。在远距离输送电能时，须将发电机的输出电压通过升压变压器将电压升高到几万伏或几十万伏，以降低输电线电流，从而减少输电线路上的能量损耗。

输电线路将几万伏或几十万伏的高压电能输送到负荷区后，须经降压变压器将高电压降低，以适合于用电设备的使用。故在供电系统中需要大量的降压变压器，将输电线路输送的高压变换成不同等级的电压，以满足各类负荷的需要。

由多个电站联合组成电力系统时，要依靠变压器将不同电压等级的线路连接起来。所以，变压器是电力系统中不可缺少的重要设备。

任务一 变压器的工作原理及结构

一、变压器的工作原理

变压器是根据电磁感应原理工作的。图 1-1 是单相变压器的原理图。图中所示的闭合的铁芯上，绕有两个互相绝缘的绕组，其中，接入电源的一侧叫一次侧绕组，输出电能的一侧为二次侧绕组。当交流电源电压 $\dot{U}_1$ 加到一次侧绕组后，

就有交流电流 $\dot{i}_1$ 通过该绕组, 在铁芯中产生交变磁通 $\dot{\Phi}$, 这个交变磁通不仅穿过一次侧绕组, 同时也穿过二次侧绕组, 两个绕组分别产生感应交变电势 $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 。这时, 如果二次侧绕组与外电路的负荷接通, 便有交流电流 $\dot{i}_2$ 流入负荷, 即二次侧绕组有电能输出。

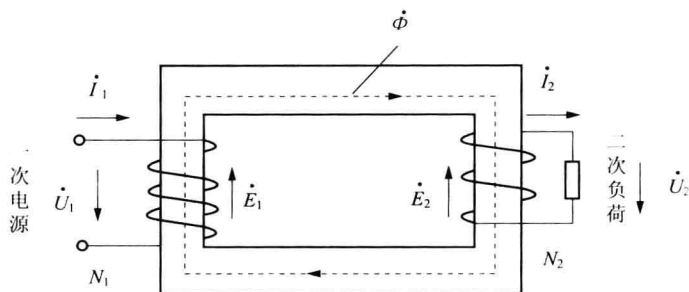


图 1-1 单相变压器的原理

根据电磁感应定律:

$$\text{一次侧绕组感应电势为} \quad E_1 = N_1 \times \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-1)$$

$$\text{二次侧绕组感应电势为} \quad E_2 = N_2 \times \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2)$$

式中, N_1 为一次侧绕组匝数; N_2 为二次侧绕组匝数; $\frac{d\Phi}{dt}$ 为铁芯中主磁通变化率。

$$\text{由式(1-1)、式(1-2)得出} \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1-3)$$

由此可见, 变压器一、二次侧感应电势之比等于一、二次侧绕组匝数之比。

由于变压器一、二次侧的漏电抗和电阻都比较小, 可以忽略不计, 因此可近似地认为:

一次电压有效值: $U_1 \approx E_1$, 二次电压有效值: $U_2 \approx E_2$ 。于是

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (1-4)$$

式中, k 为变压器的变比。

变压器一、二次侧绕组因匝数不同将导致一、二次侧绕组的电压高低不等, 匝数多的一侧电压高, 匝数少的一侧电压低, 这就是变压器能够改变电压的道理。

如果忽略变压器的内损耗, 可认为变压器二次输出功率等于变压器一次输入

功率,即

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 \quad (1-5)$$

式中, I_1 、 I_2 分别为变压器一次、二次电流的有效值。

由此可得出
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{k} \quad (1-6)$$

由此可见,变压器一、二次电流之比与一、二次绕组的匝数比成反比。即变压器匝数多的一侧电流小,匝数少的一侧电流大,也就是电压高的一侧电流小,电压低的一侧电流大。

二、变压器的结构

中小型油浸电力变压器典型结构如图 1-2 所示。

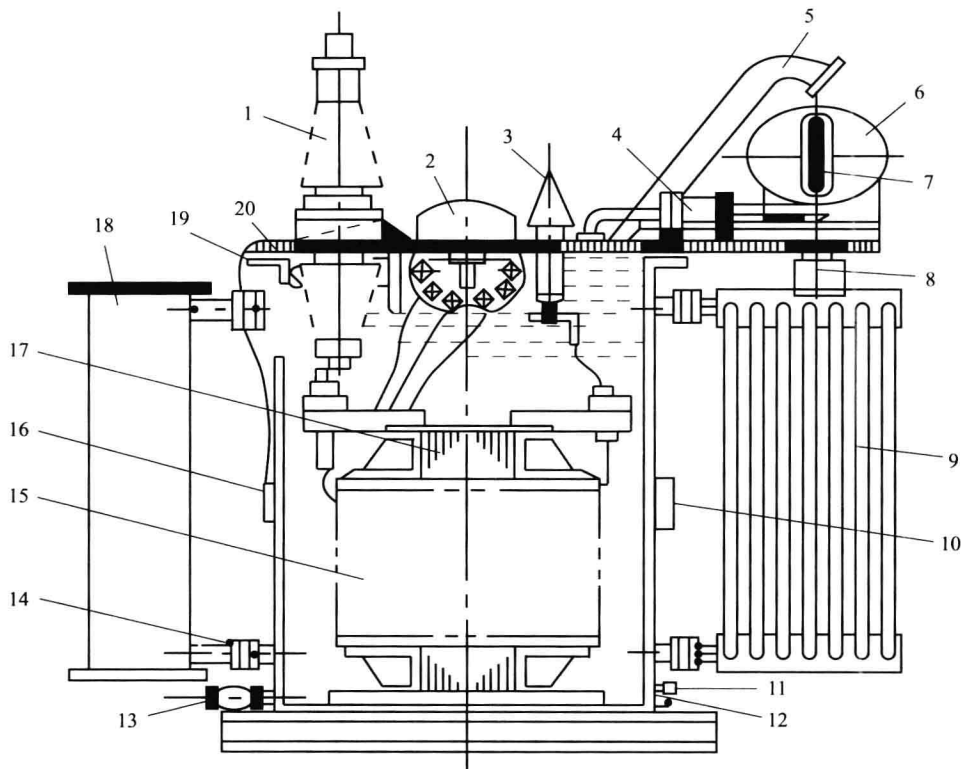


图 1-2 变压器结构示意图

- 1—高压套管; 2—分接开关; 3—低压套管; 4—气体继电器; 5—安全气道(放爆管);
6—油枕(储油柜); 7—油表; 8—呼吸器(吸湿器); 9—散热器; 10—铭牌;
11—接地螺栓; 12—油样活门; 13—放油阀门; 14—活门; 15—绕组(线圈);
16—信号温度计; 17—铁芯; 18—净油器; 19—油箱; 20—变压器油

(一) 铁芯

1. 铁芯结构

变压器的铁芯是磁路部分。由铁芯柱和铁扼两部分组成。绕组套装在铁芯柱上,而铁扼则用来使整个磁路闭合。铁芯的结构一般分为心式和壳式两类。

心式铁芯的特点是铁扼靠着绕组的顶面和底面,但不包围绕组的侧面。壳式铁芯的特点是铁扼不仅包围绕组的顶面和底面,而且还包围绕组的侧面。由于心式铁芯结构比较简单,绕组的布置和绝缘也比较容易,因此我国电力变压器主要采用心式铁芯,只在一些特种变压器(如电炉变压器)中才采用壳式铁芯。常用的心式铁芯如图 1-3 所示。近年来,大量涌现的节能性配电变压器均采用卷铁芯结构。

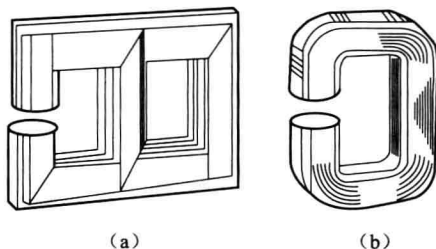


图 1-3 常用的心式铁芯

(a) 三相三柱式截面; (b) 单相卷铁芯截面

2. 铁芯材料

由于铁芯为变压器的磁路,所以其材料要求导磁性能好,导磁性能好,才能使铁损小。故变压器的铁芯采用硅钢片叠制而成。硅钢片有热轧和冷轧两种。由于冷轧硅钢片在沿着轧制方向磁化时有较高的磁导率和较小的单位损耗,其性能优于热轧的,国产变压器均采用冷轧硅钢片。国产冷轧硅钢片的厚度为 0.35 mm、0.30 mm、0.27 mm 等几种。片厚则涡流损耗大。片薄则叠片系数小,因为硅钢片的表面必须涂覆一层绝缘漆以使片与片之间绝缘。

(二) 绕组

绕组是变压器的电路部分,一般用绝缘纸包的铝线或铜线烧制而成。根据高、低压绕组排列方式的不同,绕组分为同心式和交叠式两种。对于同心式绕组,为了便于绕组和铁芯绝缘,通常将低压绕组靠近铁芯柱。对于交叠式绕组,为了减小绝缘距离,通常将低压绕组靠近铁扼。

(三) 绝缘

变压器内部主要绝缘材料有变压器油、绝缘纸板、电缆纸、皱纹纸等。

(四) 分接开关

为了供给稳定的电压、控制电力潮流或调节负载电流,需要对变压器进行电压调整。目前,变压器调整电压的方法是在其某一侧绕组上设置分接,以切除或增加一部分绕组的线匝,以改变绕组的匝数,从而达到改变电压比的有级调整电压的方法。这种绕组抽出分接以供调压的电路,称为调压电路;变换分接以进行调压所采用的开关,称为分接开关。一般情况下是在高压绕组上抽出适当的分接。这是因为高压绕组一则常套在外面,引出分接方便;二则高压侧电流小,分接引线 and 分接开关的载流部分截面小,开关接触触头也较容易制造。

变压器二次侧不带负载,一次侧也与电网断开(无电源励磁)的调压,称为无励磁调压,带负载进行变换绕组分接的调压,称为有载调压。

(五) 油箱

油箱是油浸式变压器的外壳,变压器的器身置于油箱内,箱内灌满变压器油。油箱结构,根据变压器的大小分为吊器身式油箱和吊箱壳式油箱两种。

(六) 冷却装置

变压器运行时,由绕组和铁芯中产生的损耗会转化为热量,必须及时散热,以免变压器过热造成事故。变压器的冷却装置是起散热作用的。根据变压器容量大小不同,采用不同的冷却装置。

对于小容量的变压器,绕组和铁芯所产生的热量经过变压器油与油箱内壁的接触,以及油箱外壁与外界冷空气的接触而自然地散热冷却,无须任何附加的冷却装置。若变压器容量稍大些,可以在油箱外壁上焊接散热管,以增大散热面积。

对于容量更大的变压器,则应安装冷却风扇,以增强冷却效果。

当变压器容量在 $50\,000\text{ kV}\cdot\text{A}$ 及以上时,则采用强迫油循环水冷却器或强迫油循环风冷却器。与前者区别在于循环油路中增设了一台潜油泵,对油加压以增加冷却效果。这两种强迫循环冷却器的主要差别为冷却介质不同,前者为水,后者为风。

(七) 储油柜(又称油枕)

储油柜位于变压器油箱上方,通过气体继电器与油箱相通,如图 1-4 所示。

当变压器的油温变化时,其体积会膨胀或收缩。储油柜的作用就是保证油箱内总是充满油,并减小油面与空气的接触面,从而减缓油的老化。