

中等专业学校教材

机电磁元件

王乃坤 编



上海科学技术出版社

中等专业学校教材
机 电 磁 元 件
王 乃 坤 编

上海科学技术出版社出版
(上海瑞金二路 450 号)

图书书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 16 字数 380,000
1986 年 10 月第 1 版 1986 年 10 月第 1 次印刷
印数: 1—2,100

书号: 15119·2512 定价: 2.35 元

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初,由于各有关院校,特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合,共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要,反映国内外电子科学技术水平,达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求,在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上,电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》,中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会,作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构,并制定了一九八二年到一九八五年教材编审出版规划,列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量,适当增加教材品种的思想指导下,这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿,主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材,分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验,这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评、建议,共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系由电子类专业教材编审委员会元器件编审小组评选审定,并推荐出版。

该教材由南昌无线电工业学校王乃坤主编,王焕铭、顾正主审。编审者均依据元器件编审小组审定的编写大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时数为 140 学时,主要内容为铁芯变压器及扼流圈、电接触元件、继电器等机电元件的原理、结构和特性。全书十七章,分三个单元。第一单元(第一章至第八章)主要介绍各种类型电子变压器的工作原理、结构、技术特性及应用。其中对电源变压器的结构设计及计算,作了较详细的讨论,在此基础上介绍了滤波扼流圈、音频变压器和脉冲变压器的结构计算。对其他铁芯器件,只简述其工作原理及特性。

第二单元(第九章至第十二章)介绍电接触元件,主要阐述电接触的基本概念;介绍各种类型的转换开关和连接器的结构、特点及技术性能。

第三单元(第十三章至第十七章)介绍继电器,着重介绍电磁继电器的结构类型及其各种特性,介绍了磁路系统及绕组的计算。此外,对其他各种类型继电器的结构及工作原理、技术特性等,也作了简略的介绍。

由于本书涉及的元件品种、类型繁多,各类元件的结构、性能各异,而且有不少新材料、新结构、新品种接踵问世。书中所列内容,必然会有漏缺。在使用本教材时,希望能根据生产技术的发展,补充新的内容。

担任审阅的同志,为本书提出许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 铁 芯 变 压 器

第一节 变压器和扼流圈的应用	1	第三节 变压器的工作原理	8
第二节 铁芯器件的典型结构	2	第四节 铁芯磁路	11

第二章 电 源 变 压 器

第一节 电源变压器的技术参数	18	第五节 高频电源变压器	38
第二节 电源变压器的结构计算	23	第六节 电源变压器计算实例	40
第三节 变压器绝缘结构设计	30	第七节 自耦变压器	47
第四节 变压器的热计算	36	第八节 三相电源变压器	48

第三章 滤波扼流圈

第一节 扼流圈的应用	53	第三节 扼流圈的结构计算	56
第二节 有直流磁化时的铁芯线圈	54		

第四章 音 频 变 压 器

第一节 音频变压器的特性	65	第四节 电参数计算	74
第二节 音频变压器的电参数	67	第五节 变压器的屏蔽	83
第三节 音频变压器的结构计算	72	第六节 常用音频变压器	85

第五章 脉 冲 变 压 器

第一节 脉冲变压器的应用	89	第三节 脉冲变压器铁芯磁化过程	94
第二节 脉冲变压器的波形失真	91	第四节 脉冲变压器结构及计算	97

第六章 铁磁稳压装置

第一节 铁磁稳压器的应用	101	第四节 稳压变压器	106
第二节 磁饱和变压器	102	第五节 参量变压器	110
第三节 铁磁谐振稳压器	103	第六节 磁控扼流圈	116

第七章 变压器的制造工艺

第一节 铁芯制造工艺	123	第三节 变压器的装配	130
第二节 线包制造	127		

第八章 变压器的测试

第一节 电源变压器测试	132	第三节 音频变压器测试	136
第二节 滤波扼流圈测试	135		

第九章 电 接 触

第一节 接触电阻	141	第三节 触点的磨损	147
第二节 接触方式和触点形状	145	第四节 常用电接触材料	150

第十章 转 换 开 关

第一节 转换开关的主要技术参数	153	第三节 拨动式开关	160
第二节 旋转式开关	156	第四节 按动式开关	162

第十一章 连 接 器

第一节 连接器的基本要求	165	第三节 常用连接器	173
第二节 接触对	168	第四节 绝缘基座	178

第十二章 接触元件的测试

第一节 接触电阻的测试	181	第三节 换接时间和寿命试验	182
第二节 操作力矩的测试	181		

第十三章 继 电 器

第一节 继电器的类型	184	第二节 继电器性能参数	185
------------------	-----	-------------------	-----

第十四章 电 磁 继 电 器

第一节 电磁继电器结构	189	第四节 安匝计算	210
第二节 触点簧片组	195	第五节 线圈与绕组计算	214
第三节 继电器的磁路系统	200		

第十五章 常用电磁继电器

第一节 交流继电器	218	第四节 舌簧继电器	225
第二节 极化继电器	220	第五节 其他电磁继电器	230
第三节 磁保持继电器	223		

第十六章 特殊继电器

第一节 晶体管继电器	233	第四节 压电陶瓷继电器	238
第二节 时间继电器	235	第五节 驻极体继电器	238
第三节 温度继电器	237	第六节 谐振继电器	239

第十七章 继电器的制造与测试

第一节 继电器零件的制造	242	第三节 继电器的电性能测试	244
第二节 继电器的装配与调整	243	第四节 继电器的过载试验及寿命试验 ..	247

第一章 铁芯变压器

第一节 变压器和扼流圈的应用

在电子仪器设备中,常需用各种类型的变压器来实现变换电压、传递信号或功率、阻抗匹配等功能。如交流供电的无线电机,常需通过变压器来改变电源电压;经过整流后,则要用滤波扼流圈来平整直流电压。在音频电路中,音频信号电压及功率的传递,如电压输入、级间的耦合、调制及功率输出,都需用相应的变压器或扼流圈。在低频工作范围,这些变压器及扼流圈都带有铁芯,因此通称为铁芯器件。下面就铁芯器件在电路中的位置及功用,分别给以说明。

一、电源变压器

电源变压器是向电子设备的电源电路提供各种工作电压的变压器。按其负载性质及工作情况不同,可分为整流变压器、灯丝变压器及一些特殊要求的电源变压器等。

整流变压器是接在整流电路输入端的变压器,以供给整流元件及电路所需的电压。变压器的参数及要求,取决于不同的整流电路及负载的性质。

灯丝变压器是用来加热电子管灯丝的。一般灯丝电压都较低,如 2.5、5、6.3 V 等,因此这种变压器总是降压的,而且多数为纯电阻负载。不过对电压的精度要求较高。电压偏高或偏低都将使电子管不能正常工作或缩短工作寿命。

大功率电子管的灯丝一般为多股钨丝制成,其热态时的电阻为冷态电阻的十几倍。起动时,通过冷态灯丝的电流将为额定灯丝电流的十几倍。为了防止过大的起动电流冲击而损坏电子管,大功率管的灯丝变压器常需采用一种限流变压器,其起动电流不超过额定值的 1.5~2 倍。

小型无线电机中,整流变压器和灯丝变压器(或还有提供其他电源电压的变压器)合用一个铁芯及一个初级绕组,将整流绕组和灯丝绕组等都绕在一个骨架上。这种能提供几种不同输出电压的变压器可以有效地节省材料、缩小体积并减轻重量。

电源电压波动,将影响电子仪器设备的正常工作。利用铁磁谐振特性制成的稳压变压器或其他交流稳压器可以提供相当稳定的电源电压。

工业电网上各种电器设备的起动、运行,雷电及电台发射等,都会使工频电源混入噪声。在电子计算机的电源电路中,为了抑制这类噪声,常采用“超隔离变压器”。

电源变压器一般都工作在工频(50 Hz),携带式及航空设备中则采用 400、800 Hz 或更高的频率,以缩小电源变压器的体积。

二、音频变压器

音频变压器是在音频放大电路中用作变换电压、传递功率、进行阻抗匹配的元件。也作为在电气上需要相互隔绝的两个电路间的耦合元件。这种变压器工作于一个较宽的频率范

围,如从 20 Hz 到 20 kHz,甚至更高的超声频率。

根据变压器在电路中的位置及其所担负的任务,音频变压器有输入变压器、级间变压器、输出变压器、调幅变压器、匹配变压器等,以及特殊要求的选择性变压器。

研究音频变压器时,要把变压器作为电路的一部分(电子管电路或晶体管电路),用放大电路的工作原理进行分析。明确音频变压器与放大电路之间的关系,然后对变压器本身的设计计算进行分析。

三、脉冲变压器

脉冲变压器是用在雷达、电视发射、接收设备及其他仪器中作为转换电压、改变极性、隔直流、阻抗匹配等工作的元件。如用于间歇振荡器的脉冲变压器、电视机的行输出变压器等。

脉冲变压器与音频变压器的差别在于它不是工作在音频信号的连续工作状态,而是间歇工作状态。因脉冲持续时间、工作电压及负载阻抗都可能在较大的范围内变动,而且不同的变压器所传递的脉冲波形也有所不同,所以各种脉冲变压器的性能参数和结构也有其特殊的要求。

四、扼流圈

交流电源电压经过整流后,输出端是单向的脉动电压而不是真正的直流,必须通过滤波器来平整电压。在滤波电路中常采用滤波扼流圈,因它对交流电压呈现较大的阻抗,使交流成分受到抑制,滤波后的电压接近于理想的平整直流。

已整流波中交流成分的基波频率,取决于电源频率及整流电路。如 50 Hz 电源电压经单相全波整流后,其脉动部分的基波频率为 100 Hz。因此,滤波扼流圈通常工作于一个固定的较低的频率。在开关电源中使用的扼流圈其工作频率可高达几十 kHz。由于频率很高,这种扼流圈的参数和结构具有一些特点。

在音频放大器及其他电路中,有时也利用扼流圈阻抗大的特性,如在放大器的并馈电路中,常用扼流圈起到调幅级与功率放大级间的耦合作用。

除上述各种变压器及扼流圈外,还有利用铁芯的磁饱和性质制成的稳压装置,使电源电压在相当宽的范围内变动时保持稳定的输出电压。如利用铁芯的非线性磁化特性制成的磁控扼流圈及磁放大器;利用铁芯线圈的参量变化而引起参量激励振荡的参量变压器等。关于这些铁芯器件的应用及工作原理,也将在后面作简单介绍。

第二节 铁芯器件的典型结构

各种铁芯变压器和扼流圈的作用和性能虽各不相同,但它们的结构形式都是相似的。在典型的铁芯变压器结构中,有铁芯、线包、绝缘和保护、装夹和安装零件、引出线或端子等组成。

一、铁芯

铁芯是变压器的基本组成部分。在线圈中加入铁芯可使线圈的电感量显著增大,并可

增大线圈间的耦合。

为了减小铁芯中的功率损耗,一般铁芯都是用很薄的高导磁材料(如硅钢片、坡莫合金钢片)叠成。钢片表面有氧化膜或漆层使片间互相绝缘,以减小铁芯中的涡流。小功率或高频变压器及扼流圈,有用铁氧体制成的铁芯。新材料非晶态磁性合金具有优异的磁性能,在铁芯器件特别是开关电源变压器中的应用将有良好的前景。

铁芯的形式有壳式、心式、环形、三相及一些特殊结构。按铁芯的制造工艺,可分为叠片式铁芯和卷绕铁芯两种。

1. 壳式铁芯 壳式铁芯的形状象个“日”字,如图 1-1(a)。变压器的线包安置在铁芯的中心柱上,铁芯的两侧磁路形成一个“壳”,围在线包外面。为了便于装配,铁芯钢片通常由 E 片和 I 片组成,也可采用中心柱带切缝的钢片。

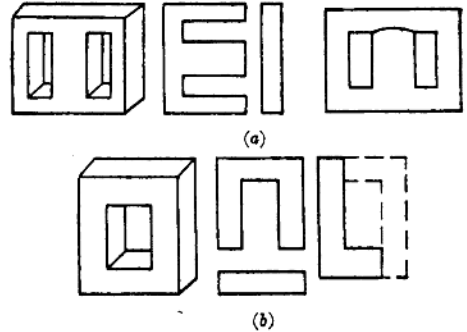


图 1-1 叠片式铁芯
(a) 壳式; (b) 心式

为减小铁芯装配时磁路中形成的非磁性空隙,可采用交插式叠片方法。但在有些变压器及扼流圈的磁路中,需要有非磁性空隙,可采用对接式叠片组。

2. 心式铁芯 心式铁芯的形状象“口”字,如图 1-1(b)。采用这种铁芯的变压器通常有两个线包,分别装在铁芯两边的心柱上。这样,变压器线包所用的导线较少,变压器的铜耗较低,而且线包的散热面积较大,适用于较大功率的变压器。另一方面,两个线包受外界杂散磁场所感应的电动势方向相反,杂音干扰小。

心式铁芯可以用 II 形钢片和 I 形钢片组成,也可由两块 L 形钢片组合。叠片可采用交插法或对接法。大功率变压器的铁芯较大,为节省用料,常采用两种不同长度的矩形钢片组成“口”字形的四边。

质量要求较高的变压器,用较薄的冷轧硅钢带卷绕铁芯。卷绕后剖切成两半片,切面经研磨后对接成心式或壳式铁芯。在电子工业部标准中命名为 CD 型、ED 型,如图 1-2。由于卷绕时顺着钢片的辗轧方向,铁芯材料的磁性能得以充分利用。

3. 环形铁芯 环形铁芯常用卷绕钢带制成,如图 1-3。这种铁芯的特点是磁路中没有空隙,材料的磁性能可得到充分运用。环形铁芯变压器的漏磁场很弱,受外界杂散磁场的干扰小。但是在环形铁芯上绕线的工艺比较复杂,需用专用的环形绕线机来绕制。

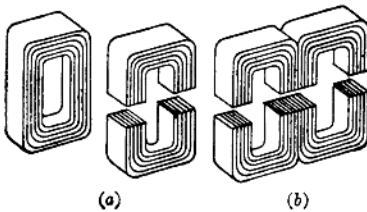


图 1-2 卷绕铁芯
(a) CD 型; (b) ED 型

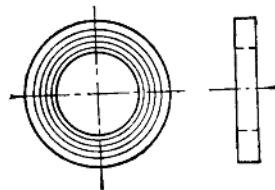


图 1-3 环形铁芯

小功率变压器用铁氧体铁芯,是将铁氧体配料模压成圆环或E形块,烧结成形。

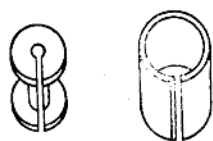


图 1-4 线轴式铁芯

随着集成电路的发展,出现一系列印制板上焊装的新型变压器。这些变压器中,除采用微型冲片和超小型环形铁芯外,还有线轴式、弯管式等。图 1-4 所示为坡莫合金制成的线轴式铁芯,线轴外部再套一个磁性外套以形成外部磁路。为了减小磁路中的涡流损耗,线轴和磁性外套都有纵向切缝。目前国内已试制成线轴式铁芯的微型变压器及扼流圈,其外形尺寸为 $\phi 10 \times 9(\text{mm})$ 。

二、线包

变压器和扼流圈的线包是在绝缘骨架上用导线绕成绕组。通常,变压器线包有一个初级绕组和几个次级绕组,而扼流圈的线包往往只有一个绕组。在绕组与绕组之间及绕组外面都裹以绝缘层。

骨架必须具有一定的机械强度、抗电强度和耐热稳定性。通常用纤维板、胶纸板、胶布板等制成矩形管筒。为了绕线方便起见,可在管筒两端及中间加墙板或隔板,以保证线包的质量。

小型变压器可用塑料直接模压制成骨架,墙板与中间隔板等都同骨架一次成型。几种典型的骨架见图 1-5。

通常采用漆包线绕制成多层平绕式绕组,相邻两层间衬入绝缘纸,以便于绕线,并防止层间电压击穿。

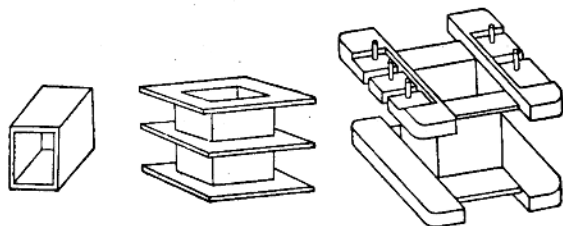


图 1-5 变压器骨架

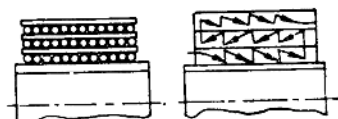


图 1-6 多层平绕和杂乱绕法

当工作电压不太高时,可以采用杂乱绕法,即不要求很有规律的层次排列。采用这种绕法,对导线的漆层绝缘要求较高。有时为了降低相邻匝间可能出现的较高电位差,往往在绕一部分匝数后垫一层绝缘纸,再绕以后部分,如图 1-6。

变压器的线包中有一个初级绕组和几个次级绕组。初、次级绕组的排列方式有“层状”和“盘状”两种,如图 1-7。层状绕组是在骨架上先绕初级(或次级)绕组,裹上绝缘层后再绕另一个绕组,这样在线包的剖面上看到各个绕组按层排列;盘状绕组是在骨架两端分别绕初、次级绕组,每个绕组都像个“盘子”。盘状绕法的固有电容较小,但绕线工艺比较复杂,而且盘形绕组间要加隔板,以使绕组有足够的机械强度。

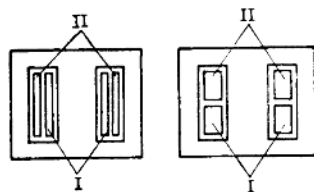


图 1-7 层状绕组与盘状绕组

绕组导线通常采用漆包绝缘线。大功率变压器中也有采用丝漆包线、纱漆包线或玻璃

纤维绝缘漆包线等。电流大的绕组需用扁铜线绕制,也有采用带绝缘的金属薄带或箔状导体的。薄型导体可以有效地提高铁芯窗孔中铜的占空系数,而且工艺也较简单。

三、绝缘结构

变压器和扼流圈的绝缘结构有内部绝缘和外部绝缘两部分。

内部绝缘指线包内部导体间的绝缘,如线圈匝间绝缘、层间绝缘、各绕组间的绝缘以及绕组与铁芯间的绝缘等。

外部绝缘是指暴露在空气中的绝缘结构,如整个变压器的裹覆材料、线包的端封材料、绕组的引出线或端子的绝缘等。

随着电子技术的发展,设备的使用条件日趋苛刻,对电子设备可靠性的要求也越来越高。相应地对设备中的元件也提出更高的要求。因此,变压器和扼流圈在可靠性方面的要求也将成为重要的技术指标。

在变压器和扼流圈中最薄弱、最易出现故障的部分是绝缘结构,这是严重影响元件可靠性的部位。常见的绝缘结构故障为:绕组间或绕组与地间的绝缘电阻降低或电压击穿;绕组的层间或匝间短路或击穿;绝缘构件的热老化及电老化而使绝缘性能变劣。

因此,变压器及扼流圈的寿命及可靠性主要取决于绝缘构件的性能及其寿命。可见绝缘材料在变压器及扼流圈中占有极重要的地位。

对绝缘材料的要求主要从材料的热性能和电性能两方面考虑。

根据国际电工委员会(IEC)规定,绝缘材料的工作温度划分为七个等级,见表 1-1。

表 1-1 绝缘材料温度等级

耐热等级	Y	A	E	B	F	H	C
工作温度(°C)	90	105	120	130	155	180	180 以上

耐热等级较低的绝缘材料,其工作温度不仅与材料本身的耐热性有关,还取决于工艺过程。如电缆纸就其本身而言,工作温度为 105°C,属于 A 级。但当用 B 级绝缘漆(如 3404 环氧树脂漆)浸渍后,耐热性就可提高到 E 级;又如醇酸玻璃布的基础材料耐热性很好,但其热性能则受醇酸漆的限制。

在变压器及扼流圈中常用的绝缘材料有:

A 级,电绝缘纸类浸 A 级绝缘漆(沥青漆、酚醛树脂漆等)、黄蜡布、黄蜡绸;

E 级,电绝缘纸类浸 3404 环氧树脂漆、聚酯薄膜;

B 级,醇酸玻璃漆布、乙酰化纸、氟化纸;

H 级,有机硅玻璃布。

导线绝缘也有不同的耐热等级,如常用牌号为 Q 的油基性漆包线及牌号为 QQ 的高强度漆包线,都属 A 级;牌号为 QZ 的聚酯漆包线,则可达到 B 级绝缘。玻璃丝包线则完全可用作 B 级绝缘。

由于绝缘构件的可燃性所酿成的火灾事故,在国内外也屡见不鲜。变压器和扼流圈在工作过程中过热或是高压端子打火、飞弧,都有可能引燃变压器中的有机绝缘材料,如纸、浸渍漆、灌封材料等。因此,从安全防火角度出发,提高材料的阻燃性能,也是变压器生产中需

进行研究的一个重要课题。目前,在变压器中常用的阻燃材料是在原有材料基础上添加含溴反应型阻燃剂及含锡化合物(如 Sb_2O_3) 辅助阻燃剂。如在聚丙烯、聚氯乙烯等塑料中添加阻燃剂制成阻燃塑料用来压制变压器及线圈骨架;在环氧树脂中配入适量的阻燃剂制成自熄性环氧树脂;在各种浸渍漆中也可以增添阻燃剂以达到阻燃的目的。

阻燃材料在国内近几年才应用,对各种阻燃材料性能的测试及阻燃机理的认识都尚未成熟。可以预见,随着各种阻燃材料的研制和广泛的试验与应用,在这方面必将取得新的成就。

绝缘材料的电性能是指绝缘电阻、绝缘强度(抗电强度)及绝缘电晕放电等。此处只着重说明电晕放电现象的形成及其危害性。

电晕放电是空气在较高电场强度下发生的游离现象,放电时伴随有连续的嘶嘶声和晕光出现。电晕放电产生一种宽频谱的高频信号,用无线电接收机可以收到这种高频信号。

由于绝缘材料本身(如纸、布等)及线圈的匝间和层间以至绕组之间都不可避免地含有空隙和气泡,完善的工艺(如真空浸渍)只能减小空隙而不能使它绝对消除。当在绝缘构件的厚度两面存在电位差,即材料处于电场中时,空隙中的空气也承受一定的电场。可以证明,这时绝缘材料基体及气泡上电场强度的分配关系大致为:

$$\frac{E_g}{E} = \frac{\epsilon}{\epsilon_g} \quad (1-1)$$

式中, E_g 为气泡承受的电场强度; E 为绝缘材料基体的电场强度; ϵ 为绝缘材料的介电系数; ϵ_g 为空气的介电系数。

可以认为, $\epsilon_g = 1$ (指相对值), 则比值 $E_g/E = \epsilon$ 。设绝缘基体材料的相对介电系数 $\epsilon = 3$ 时, 则气泡所承受的电场强度 E_g 即为绝缘构件电场的三倍。当外加电压到某一数值时, 气泡所承受的电场已使气体接近电离状态, 空气即开始放电, 产生电晕。

因此, 当绝缘系统中存在气泡时, 起晕电压不决定于绝缘材料的抗电电场强度, 而取决于材料的介电系数和空气的电离电场强度。电晕的来源不是绝缘材料本身, 而是系统中的气泡。

电晕放电的结果, 将给变压器及扼流圈的绝缘带来不可复原的损害。这种损害表现在几个方面:

① 腐蚀作用: 电晕放电使空气中的氧气形成活性气体臭氧 (O_3)。它有强烈的氧化作用, 对大部分有机绝缘材料都会起作用, 而对高分子聚合物的腐蚀性尤为严重。除臭氧外还会产生一氧化氮, 形成亚硝酸, 对有机物也有腐蚀作用。此外, 这些腐蚀性气体对金属材料如导线也有化学腐蚀作用。

② 机械力作用: 空气电离后, 形成大量的电子和离子。在电场作用下, 这些粒子以高速冲击绝缘基体, 使基体出现局部的凹陷。长时期冲击的结果, 会形成穿孔或导致电击穿。

在绝缘系统中有电晕放电时, 伴随着漏电流增加常使材料局部过热。这将引起局部熔融或热击穿。

绝缘结构的老化是影响元件工作寿命的重要因素, 在长期工作过程中由于内部发热产生的热效应是使材料老化的主要原因, 而在受热状态下长期暴露在空气中将进一步促使材料老化。老化的结果是使绝缘材料的电性能(如击穿电压、起晕电压及绝缘电阻)降低, 最后导致元件损坏。老化寿命的问题目前只有通过若干产品进行试验得到一些数据, 尚无统

一的标准规定。部标准提出了“加速热老化寿命”的要求及试验方法。将变压器置于高出耐热等级温度的环境中加热一定时间,然后冷却,这样连续交替冷热若干周期后再测试变压器性能,根据失效试样的寿命来计算元件的平均寿命。这种测试方法的详细规定参见部标 SJ297-76。

四、其他零件

变压器和扼流圈除了铁芯、线包和绝缘结构件等外,还有装夹零件、外壳保护及密封零件、引出线接线端子板等零件。这些零件的形状及设计,则根据变压器和扼流圈的性能及使用要求而定。

1. 装夹零件 装配好的变压器铁芯,可用螺栓夹紧。为了把 E 片和 I 片组合在一起,在铁芯两面需用联条或端盖,端盖的一边可预先制成安装用的耳瓣。小型变压器可直接用 U 形夹框夹紧。图 1-8 为几种装夹好的变压器外形。

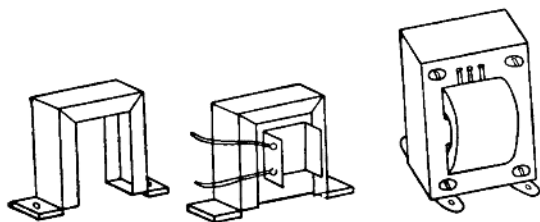


图 1-8 叠片式铁芯的装夹

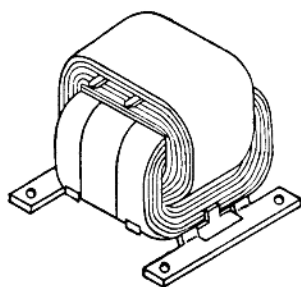


图 1-9 卷绕铁芯的箍扎

卷绕铁芯通常用薄的镀锌软钢带箍扎,钢带同时将铁芯与变压器的安装底板扎在一起,如图 1-9。因箍扎钢带是将剖切为两半的铁芯紧固在一起,紧固压力的大小对变压器的噪音、磁化电流及铁心损耗都有影响。

2. 密封保护 一般民用电器中的变压器和扼流圈,装配后经过浸渍、烘干就可投入使用。但工作在高湿度或低气压等恶劣环境中的元件必须采取密封保护措施。要求不高的场合,可用端封办法,即用环氧树脂将变压器线包两端封闭起来以防潮气侵入。也可将整个变压器用环氧树脂裹覆起来,以提高其防潮密封效果。

无论是端封或裹覆,都不能完全杜绝潮气侵入变压器线包。因在环氧树脂与金属结构件(铁芯、出线端子等)的结合面上总会存在缝隙,潮气就可通过这些缝隙侵入变压器线包内部。

完善的密封则采用金属密封外壳,将变压器封装在金属盒壳内进行灌注,然后封闭工艺孔。变压器的引线则通过玻璃或陶瓷绝缘子接出。

金属外壳可兼作变压器的屏蔽,因此通常用软钢板制成。当要求高的屏蔽效果时,还应采用铁镍合金等高导磁材料作外壳。

3. 引出线 绕组导线直径不小于 0.2mm 时,可用本绕组的导线直接引出。但为了防止装配时折断,最好还是用多股软线作为绕组的引出线。绕组导线很细时就必须用软接线引出。

一只变压器有几个绕组,为了便于装配、辨识,通常将绕组的引出线焊在接线端子板的

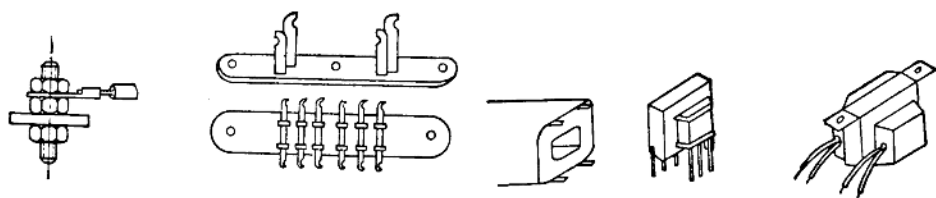


图 1-10 变压器引出线

焊片上。接线板的形状如图 1-10，在端子板上还应标出绕组的序号及电压。有的小型变压器采用带墙板的骨架，可将引线焊片直接铆接在墙板上。

4. 安装零件 变压器的安装方式是根据使用要求及整机设备中的安装部位所确定的。通常安装零件与装夹零件同时设计，如小型变压器夹框上加安装脚；变压器铁芯装夹零件上预先考虑安装孔等。

第三节 变压器的工作原理

一、变压器工作的物理过程

图 1-11 所示的简单变压器有一个初级绕组和一个次级绕组。当初级端加上交变电压

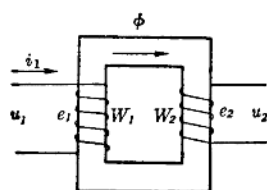


图 1-11 简单的变压器

u_1 时，初级线圈中就有电流 i_1 通过。这个电流所形成的磁势，在铁芯中产生交变的磁通 ϕ 。因磁通与初、次级线圈交链，在两个线圈中分别感应产生交变电动势 e_1 及 e_2 。

初级感应电势 e_1 的方向与外加电压 u_1 相反，限制 i_1 增大。当变压器输出端

不接负载时，这个电流就是变压器的空载电流，通常用 i_0 表示。

次级绕组感应电势 e_2 就是变压器输出端的开路电压。当接上负载时，就会有负载电流 i_2 通过次级线圈， i_2 形成的磁势将使铁芯中的磁通发生变化。在外加电压不变的情况下，初级电流也将增大，以抵消 i_2 的磁势。初级电流所增加的部分可以看作是反射到初级端的负载电流。

下面分析上述各个物理量之间的关系。

二、感应电势方程

根据电磁感应定律，当铁芯中的磁通 ϕ 变化时，初、次级线圈中的感应电势为：

$$\left. \begin{aligned} e_1 &= -W_1 \frac{d\phi}{dt} \\ e_2 &= -W_2 \frac{d\phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中， W_1 、 W_2 为初、次级线圈的匝数； ϕ 为铁芯中的磁通量 (Wb)； t 为时间 (s)。

由此可见，两个线圈感应电势的比值即为二线圈的匝数比 n (或称转换系数)

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{W_2}{W_1} = n \quad (1-3)$$

式(1-2)为感应电势的基本公式,适用于各种不同波形变化的交变电压,如正弦波、锯齿波、各种脉冲波形等。其中正弦波形具有广泛的代表性,因此着重研究正弦波时的感应电势方程。

设铁芯中的磁通为正弦波形,即

$$\phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (1-4)$$

式中, Φ_m 为磁通的最大值; ω 为磁通变化的角频率。

将式(1-4)代入式(1-2),可得

$$e_1 = -W_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = W_1 \omega \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (1-5)$$

比较(1-5)及(1-4)二式,可见感应电势也是正弦波形,而其相位较磁通滞后 $\frac{\pi}{2}$ 弧度(90°)。感应电势的最大值及有效值分别为

$$\begin{aligned} E_{1m} &= \omega W_1 \Phi_m = 2\pi f W_1 B_m S_0 \\ E_1 &= 0.707 E_{1m} = 4.44 f W_1 B_m S_0 \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中, f 为工作频率(Hz), 即 $2\pi f = \omega$; S_0 为铁芯净截面积(m^2); B_m 为铁芯中的最大磁感应强度(T), 且 $B_m S_0 = \Phi_m$ 。

同样可得次级线圈中感应电势的有效值为

$$E_2 = 4.44 f W_2 B_m S_0 \quad (1-7)$$

及

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{W_2}{W_1} = n \quad (1-8)$$

三、绕组中的电流

变压器空载时, 初级绕组中的电流主要是维持铁芯磁化的电流(忽略铁芯中的功率损耗), 称为磁化电流, 用 I_μ 表示。而铁芯中的磁场强度(磁化力)为

$$H = \frac{W_1 I_\mu}{l_0} \quad (\text{A/cm}) \quad (1-9)$$

式中, W_1 为初级绕组匝数; I_μ 为磁化电流(A); l_0 为铁芯磁路长度(cm)。

变压器次级接上负载后, 次级线圈就有负载电流 I_2 , 它的磁势将使铁芯磁路的磁场强度及磁感应发生变化。但在外加电压不变的情况下, 铁芯的工作状态(B_m 及 H) 应基本上保持不变。因此, 初级线圈中的电流必须增加一个分量 I'_1 以抵消次级负载电流的磁势, 即

$$W_1 I'_1 + W_2 I_2 = 0$$

或

$$I'_1 = -n I_2 \quad (1-10)$$

I'_1 的物理意义是反射到初级端的负载电流。式(1-10)中的负号表示两个电流的相位相反, 磁势互相抵消。因此, 加上负载后, 初级线圈的总电流为

$$I_1 = I_\mu + I'_1 \quad (1-11)$$

必须指出, 上式中电流的相位不同, 因此总电流是磁化电流与负载电流的矢量和。

磁路的总磁势可用全电流定律表示:

$$\Sigma W I = W_1 I_1 + W_2 I_2 = W_1 I_\mu = H l_0 \quad (1-12)$$

四、变压器的矢量图

实际的变压器铁芯必然有功率损耗。因此,当空载时,初级除磁化电流外,还有提供铁芯损耗的等效电流 I_0 , 它的相位超前于磁化电流 90° 。变压器的空载电流 I_0 应为 I_μ 与 I_0 两个电流的矢量和

$$I_0 = I_\mu + I_0 \quad (1-13)$$

而加负载后初级的总电流为

$$I_1 = I_0 + I_1' \quad (1-14)$$

初、次级绕组的导线都有一定的电阻。此外,由于初、次级绕组不完全耦合,即有一部分磁通只与初级绕组或次级绕组或其中的一部分圈匝交链,如图 1-12 中的 ϕ_{s1} 、 ϕ_{s2} 。这些漏磁通使初、次级绕组间存在漏感。

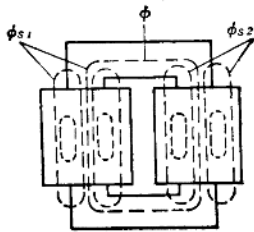


图 1-12 变压器的漏磁通

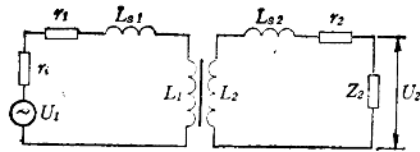


图 1-13 变压器初、次级电路

考虑到这些参量后,变压器初、次级电路如图 1-13 所示。电路的电压、电流关系为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= -E_1 + I_1(r_1 + jX_1) \\ U_2 &= E_2 - I_2(r_2 + jX_2) \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

式中, U_1 为外加电源电压; U_2 为次级输出电压; E_1 、 E_2 为初、次级感应电势; r_1 、 r_2 为初、次级绕组导线电阻; X_1 、 X_2 为初、次级绕组漏感抗, $X_1 = \omega L_{s1}$; $X_2 = \omega L_{s2}$ 。

以上各式中, U 、 E 、 I 等都是旋转矢量。还应注意到, E_1 、 E_2 的相位比磁化电流 I_μ (或 ϕ) 滞后 90° , 即 $E_1 = -j\omega LI_\mu$ 。

这样,变压器初、次级电路的电压、电流关系可用图 1-14 的矢量图表示。

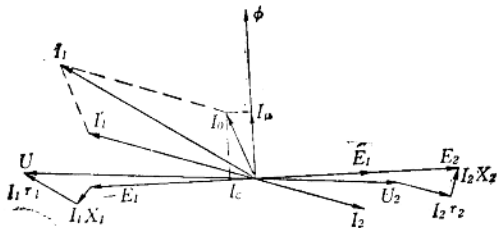


图 1-14 变压器的矢量图

五、变压器的等效电路

当变压器的初、次级绕组匝数相等时,即 $E_1 = E_2$ 。如果把初、次级绕组在电路上联接起来,这样并不影响对变压器运行情况的分析。

变压器初、次级绕组匝数不同时(匝数比为 n)，可以把次级电路的参数经过转换,归算到初级一端(当然,也可以把初级电路的参数归算到次级一端)。经过归算的参量都加上“'”,并在漏感符号下加“s”脚标,转换关系为