

高等职业技术教育城市轨道交通控制类系列教材

中国职业技术教育学会轨道交通专业委员会推荐教学用书

主编◎张立群
主审◎穆中华

唐匀生

城轨控制 电源设备维护



西南交通大学出版社

[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高等职业技术教育城市轨道交通控制类系列教材

中国职业技术教育学会轨道交通专业委员会推荐教学用书

主编◎张立群
主审◎穆中华
唐匀生

城轨控制 电源设备维护

西南交通大学出版社
<http://press.swjtu.edu.cn>

图书在版编目 (C I P) 数据

城轨控制电源设备维护 / 张立群, 唐匀生主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2011.4

高等职业技术教育城市轨道交通控制类系列教材
中国职业技术教育学会轨道交通专业委员会推荐教学用书

ISBN 978-7-5643-1117-9

I. ①城… II. ①张…②唐… III. ①城市铁路—电源—维护—高等职业教育—教材 IV. ①U239.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 039252 号

高等职业技术教育城市轨道交通控制类系列教材
中国职业技术教育学会轨道交通专业委员会推荐教学用书

城轨控制电源设备维护

主编 张立群 唐匀生

责任编辑	黄淑文
封面设计	原谋设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮政编码	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	15.25 插页: 2
字 数	389 千字
版 次	2011 年 4 月第 1 版
印 次	2011 年 4 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-1117-9
定 价	27.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

针对当前铁道通信信号、城市轨道交通通信信号的发展状况,为适合当前形势发展的城市轨道交通控制专业教材是教学的需求,由城市轨道交通控制专业教学教材研讨会研讨确定编写本教材。城轨控制电源设备是为轨道交通控制(信号)设备提供各种电源的设备。随着我国城市轨道交通行业、铁路运输行业的快速发展,信号设备也有了突飞猛进的发展,采用了许多先进的技术和新设备。这些先进的设备对供电设备也有了更高的要求,同时,一些先进的电子技术、计算机技术、多媒体技术、通信技术也广泛应用于供电系统中。

按照城市轨道交通行业、铁路运输行业对信号这一岗位的需要,本着职业教育人才培养目标和本课程的课程标准,根据实际信号设备供电系统的设备情况,本教材重点编写了大站电源屏和智能电源屏。由于智能型电源屏生产厂家比较多,而且技术、型号各不相同,本教材主要以实际应该较多的 PDZG 型智能电源屏和 PZ 系列信号智能电源屏为例进行介绍。同时对电源屏中应用到的各种电器设备(变压器、稳压器、低压电气、开关电源、UPS 电源、蓄电池等)也进行介绍。由于现在信号控制系统大量应用了通信技术,电源屏中也使用了很多通信设备,所以本书还编写了通信电源部分。

本教材由辽宁铁道职业技术学院张立群任第一主编,柳州铁道职业技术学院唐匀生任第二主编,郑州铁道职业技术学院韦成杰参编,郑州铁道职业技术学院穆中华主审。张立群编写第一、二、三、四章和第九章,唐匀生编写第五、八章,韦成杰编写第六、七、十章。

该书的编写还得到了辽宁铁道职业技术学院的吴广荣、中铁九局邢献志、中铁十三局张志勇等同仁的大力支持和帮助,在此深表感谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,诚请各校师生、读者提出批评和改进意见。

编 者

2010 年 12 月

目 录

第一章 信号设备的供电概况	1
第一节 信号设备对供电的基本要求	1
第二节 信号设备的供电概况	3
复习思考题	5
第二章 变压器	6
第一节 变压器的工作原理、分类及结构	6
第二节 变压器的空载运行	9
第三节 变压器的负载运行	14
第四节 变压器参数的测定	17
第五节 变压器的运行特性	19
第六节 三相变压器	21
第七节 其他用途的变压器	29
第八节 变压器的维护与维修	32
复习思考题	33
第三章 交流稳压器	34
第一节 感应调压器	35
第二节 自动补偿式交流稳压器	40
第三节 稳压变压器	43
第四节 参数稳压器	47
复习思考题	48
第四章 低压电器	50
第一节 电气开关	50
第二节 手动开关	53
第三节 断路器	56
复习思考题	58
第五章 电机	59
第一节 三相异步电动机	59
第二节 单相异步电动机	67
第三节 直流电动机	70
复习思考题	73
第六章 开关电源	74
第一节 开关电源简述	74

第二节 直流变换器	76
第三节 监控单元	82
第四节 开关电源故障处理与维护	83
第五节 开关电源日常检查	85
复习思考题	85
第七章 UPS 和蓄电池	86
第一节 UPS 概述	86
第二节 逆变器	92
第三节 静态开关	93
第四节 蓄电池	96
第五节 UPS 操作	102
复习思考题	105
第八章 电磁式信号电源屏系统	106
第一节 联锁设备电源屏	106
第二节 区间信号设备电源屏	133
第三节 电源屏的维护与维修	137
复习思考题	141
第九章 信号智能电源屏	143
第一节 信号智能电源屏概述	143
第二节 PDZG 智能型综合信号电源屏	156
第三节 PZ 系列智能信号电源屏	181
复习思考题	221
第十章 通信电源系统概述	223
第一节 通信设备对电源系统的要求	223
第二节 通信电源系统的组成	224
第三节 通信电源系统的发展概况	230
第四节 通信电源的性能和规范	235
复习思考题	236
参考文献	237

第一章 信号设备的供电概况

信号设备是组织指挥列车运行，保证行车安全，提高运输效率，改善行车人员劳动条件的关键设备。供电系统可靠、安全、稳定地对信号设备进行供电是信号设备正常运行的基本保证。不同的信号设备使用的电源不同，对电源的要求也各不相同，但总的说来，对电源的可靠程度都有较高的要求，对供电电压和频率的稳定都有一定的要求，都要保证供电的安全。

第一节 信号设备对供电的基本要求

信号设备对供电的三大基本要求是：安全、稳定和可靠。

一、信号设备对电源可靠性的要求

原则上应将铁路信号电源与铁路其他部门的电源一起进行综合考虑，以统一和简化供电系统，并便于维护和管理。但根据其重要性和管理分工的不同，也有单独设置铁路信号供电系统的情况。铁路用电一般都是由电力部门供给的，尽可能不自设发电设备。在电气化区段，当技术与经济合理时，也可采用牵引电源为铁路信号供电。

为了保证供电可靠，按信号设备与行车的关系划分供电等级以便管理，并设置备用电源。铁路对路外供给的电源，按其可靠程度分为三类。

第一类电源：能取得两路可靠的独立电源，其中一路为专盘专线，或虽不能取得专用电源，但能由其他重要线路接引供电；供电容量满足信号设备的最大用电量；电压、频率的波动在容许范围之内，或电压波动虽较大但能稳压。

第二类电源：只能取得一路电源，但质量较好，供电容量、电压和频率的波动情况与第一类电源相同。

第三类电源：不能满足第一、二类电源条件的其他电源。

独立电源是指不受其他电源影响的电源。如一个发电机组，有专用的控制设备和馈电线路，与其他母线没有联系或虽有联系但其他母线发生故障时能自动切断联系，满足这样条件的电源称之为独立电源。

可靠电源：能昼夜连续供电，因维修和事故的停电有一定限制的电源。有关规定为：因维修计划停电，第一类电源每路每月一次，每次不超过 4 h；第二类电源每月一次，每次不超过 10 h。因事故造成的临时停电两年累计：第一类不超过 48 次，每次一般不超过 2 h；第二类不超过 100 次，每次一般不超过 4 h。

专盘专线：是指供给信号设备 10 kV 以下的不与其他负荷共用的专用配电设备和专用的电线路。

按因事故停电所造成的后果，可将信号设备的负荷等级划分如下：

- (1) 一旦发生停电就会造成运输秩序混乱的负荷为一级负荷；
- (2) 偶尔发生短时间停电不会马上打乱行车计划，但长时间停电也会影响运输秩序的负荷为二级负荷；
- (3) 其他为三级负荷。

铁路信号设备中的大站继电集中联锁、计算机联锁、自动闭塞、调度集中和调度监督、驼峰信号设备等都是一级负荷。非自动闭塞区段的中、小站继电集中联锁为二级负荷。一级负荷由第一类电源供电时，一般不需另设备用电源，但要求自动或手动转换两路电源时，供电中断时间不大于 0.15 s，以免在电源转换过程中使原吸起的继电器落下而影响行车。

自动闭塞虽为一级负荷，但因相邻两变电所可互为备用，故每一变电所并不要求引入两路独立电源，然而相邻两变电所的电源应相互独立。

在第二类电源地区，除自动闭塞外，是否适用于属于一级负荷的其他信号设备，需结合电源情况慎重考虑。一般可用该电源作主电源，但需设备用电源。二级负荷可由第二类电源供电，但也需设置备用电源。第三类电源原则上不用作一级负荷的电源。各种采用计算机的信号系统，为保证不中断供电，需使用 UPS。

二、信号设备对电源稳定性的要求

为使信号设备可靠工作，必须对信号设备供电电压的波动范围及交流电源的频率波动范围进行规定。三相交流供电时各相负载应力求平衡，以提高供电效率和设备利用率，减小电压波形的畸变。供电电压过高会使信号灯泡和电子设备的寿命大大缩短，电压过低会使信号机显示距离不足或使电子设备动作不可靠，电压脉动过剧会使电子元件的噪声过大甚至引起误动作。频率波动过甚会影响信号设备的频率特性和抗干扰性能。

供电电压、频率的允许波动范围及允许的负荷功率因数在正常情况下应符合下列标准：

交流供电电压波动，一般在 380 V 供电母线上为 $\pm 10\%$ ，因一般供电变压器输出为 400 V，已提高了 5%，所以实际上允许的交流供电电压波动范围为 380_{-60}^{+20} V。

直流供电电压波动一般为 $\pm 10\%$ 。但对于电子设备，还必须采用专用的稳压设备。

频率波动一般为 $50[1 \pm (0.5\% \sim 1\%)]$ Hz。

负荷功率因数不低于 0.85。

信号设备的导线截面应通过计算来确定，以免导线压降过大使设备电压不足而不能正常动作。对于信号电源设备，因其由电网供电，负荷的变化将引起供电电压的波动，故须设有稳压装置，以保证电压稳定在规定的范围之内。

三、信号设备对电源安全性的要求

为了保证供电安全，信号电源设备必须采取以下措施：

(1) 供给信号设备专用的低压交、直流电源都要对地绝缘, 以免发生接地故障时造成电路错误动作。供电变压器的初级和次级间应用铜板隔离接地, 以免初、次级间击穿造成漏电而影响安全。

(2) 信号设备所需要的供电种类和电压等级较多, 必须分路供电, 并用变压器隔离, 力求发生故障时缩小故障范围, 避免故障扩大化。

(3) 使用电缆供电时要考虑电缆芯线间的分布电容形成串电的问题, 必要时应分开电缆供电。

(4) 一般交流电源均由架空线路供电, 必须防止浪涌电压影响, 考虑防雷以及安全接地问题。

(5) 信号设备的保安系统如采用断路器组成, 断路器的容量需要经过计算确定, 并应满足动作的选择性(即分支断路器先动作, 总断路器后动作)及灵敏度(即动作时间)的要求。

(6) 高压(交流直流以上)设备要隔离, 以保证人身安全。

第二节 信号设备的供电概况

一、车站联锁设备的供电概况

(一) 大站继电集中联锁的供电概况

大站继电集中联锁属于一级负荷, 信号楼应引入两路可靠的独立电源, 一般将两路电源降压后同时引入信号楼在低压侧进行自动切换。

图 1.1 为大站继电集中联锁供电方式示意图。图(a)所示为第一种供电方式, 信号楼两路电源由车站环状供电系统供电。在正常情况下, 高压环状线路要在信号楼两降压变压器之间设两组分断隔离

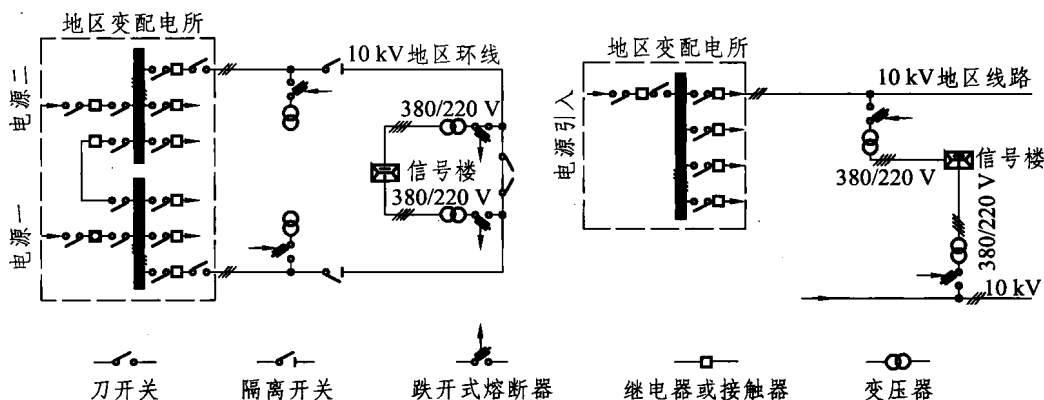


图 1.1 大站继电集中联锁供电方式示意图

开关, 即高压环状线路要在此处开口, 使两路电源能同时降压引入信号楼。此种方式适用于铁路地区变/配电所有两路独立电源引入的处所。图(b)所示为第二种供电方式, 适用于铁路地区变/配电所只有一路电源引入的处所。这种情况下必须再找一路电源, 如能从地方

供电部门、工矿企业引来一路独立电源，则在信号楼附近设一台信号专用变压器即可；如不能从地方解决第二路电源，就考虑从牵引变电所、接触网、自动闭塞电线路解决第二路电源。

大站继电集中联锁设备由大站电源屏供电。大站电源屏引入三相四线 380 V 交流电源，在电源屏内完成自动或手动的两路电源切换，具有交流稳压装置，能供给大站电气集中联锁系统所需要的各种交直流电源。

（二）中、小站继电集中联锁的供电概况

在自动闭塞区段，中、小站继电集中联锁通常由自动闭塞高压线路接引供电。在非自动闭塞区段，中、小站继电集中联锁为二级负荷，一般只接引一路第二类电源供电即可，但还应考虑在计划停电检修时，能采用备用电源的条件。

为了满足电气集中设备的供电，在非自动闭塞区段也架设信号专用电力线路，专为沿线各站电气集中联锁供电。

中、小站继电联锁采用中、小站电源屏供电。它们是单相引入，能进行两路电源的自动、手动切换；有交流稳压装置；能供给中、小站电气集中联锁所需的各种交直流电源。

在电力牵引区段，由于电源波动和牵引电流的影响，对电气集中联锁的供电还需考虑以下各点：

（1）为取得可靠的 50 Hz 电源，往往直接由 27.5 kV 接触网接引供电，由此引起两个需要解决的问题：第一，由接触网接引的是单相电源，对大站电源屏需作相应改动；第二，因受牵引电流的影响，电压波动较大，为满足信号设备用电要求，要增设交流稳压装置，一般使用 CW-10/220 型交流稳压器，它采用晶体管电路控制桥式饱和电抗器来稳压。

（2）为防止牵引电流对信号设备的干扰，轨道电路必须采用与 50 Hz 不同的频率电源。现多采用 25 Hz 相敏轨道电路，由参数式铁磁变频器或者电子变频器产生 25 Hz 轨道电源和局部电源。

计算机联锁的供电概况与继电集中联锁相同。

二、区间闭塞设备的供电概况

（一）半自动闭塞的供电概况

半自动闭塞的电源分为线路电源和局部电源，线路电源用于向邻站发送闭塞信号，局部电源供本站闭塞电路使用。当站间距离小于 11.4 km 时，两者可以合用。

在继电集中联锁的车站，局部电源由继电集中的继电器电源供给，主要是由线路电源供给，有的电源屏未设半自动闭塞电源，而有的电源屏设置了半自动闭塞电源。凡是未设这种电源的，都必须在半自动闭塞组合内设一台整流器供半自动闭塞的电源。原采用 ZG-130/0.1 型，现研制了专用的 ZG₁-42/0.5 型整流器。

（二）自动闭塞的供电概况

自动闭塞是一级负荷。自动闭塞的用电点是沿铁路线均匀分布的，一般每隔 1~2 km 就有一个信号点要供电。各信号点的主要负荷有信号机、轨道电路、继电器和电子元件等。同

时，在自动闭塞区段的车站一般都采用继电集中联锁。为了保证自动闭塞区段的可靠供电，需沿铁路线修建一条信号专用电力线路。此电力线路除供自动闭塞及该区段的其他信号设备用电外，一般不供其他负荷用电，以免受其他负荷影响而降低供电的可靠性和质量。

只有在保证信号设备用电的条件下，才允许兼供下列负荷用电：

- (1) 通信设备；
- (2) 无电源中间站的车站值班员室的照明设备。

目前，自动闭塞均采用集中安装方式，各信号点的设备（除信号机外）都集中安装在相近的车站机械室室内，因此在各信号点无需由高压电线路引入电源，只要在车站引入即可。

为保证供电可靠和符合质量要求，在自动闭塞供电系统中要考虑以下问题：

- (1) 变电所尽可能设置于当地有第一、二类电源的车站，每个变电所通常只接引一路专用电源，相邻两变电所之间电源应相互独立。
- (2) 供电臂不宜太长，以缩小故障停电影响的范围；也不要太短，否则将增加变电所数量，投资、定员都要相应增加。一般长度为 40~70 km。
- (3) 电气化区段的自动闭塞变电所尽可能布置在牵引变电所所在的车站，以便由牵引变电所的低压自用母线或 10 kV 母线上接引电源。
- (4) 自动闭塞是单相负荷，为了减小对通信线路的干扰，供电臂上各相负荷的分配应力求平衡。
- (5) 对于机车信号车上的设备，内燃机车上由蓄电池（或）浮充供电，电力机车上从控制屏引出直流电源。

三、CTC、TDCS 的供电概况

CTC、TDCS 都属于一级负荷。CTC 和 TDCS 分机设在各站继电器室或信号楼内，由所在车站电源设备供电。CTC 和 TDCS 总机设在调度所内，必须引入两路可靠的独立电源，再用专用电源供电。

复习思考题

1. 信号设备对供电有哪些基本要求？如果供电系统达不到基本要求，会对信号设备的工作产生什么影响？
2. 信号设备的负荷等级是如何划分的？哪些设备属于一级负荷？哪些属于二级负荷？
3. 哪些因素会造成供电电压波动？
4. 信号电源为什么要采用对地绝缘系统？
5. 简述车站联锁设备的供电情况。
6. 在电气化区段，对电气集中联锁的供电还应考虑哪些问题？
7. 自动闭塞、半自动闭塞的供电情况如何？
8. CTC、TDSC 系统的供电概况如何？

第二章 变压器

变压器是一种利用电磁感应原理，从一个电路向另一个电路传递电能或传输信号的一种电器，是电力系统中生产、输送、分配和使用电能的一种重要装置，也是电力拖动系统和自动控制系统中传递电能或传输信号的重要元件。

第一节 变压器的工作原理、分类及结构

变压器是一种静止的电机，它利用电磁感应原理将一种电压、电流的交流电能转换成同频率的另一种电压、电流的电能。换句话说，变压器的作用就是实现电能在不同等级之间的转换。

一、变压器的工作原理

下面以单相双绕组变压器为例分析其工作原理：在一个闭合的铁芯上缠绕两个绕组，其匝数既可以相同，也可以不同，但一般是不同的。如图 2.1 所示，两个绕组之间只有磁的耦合，而没有电的联系。

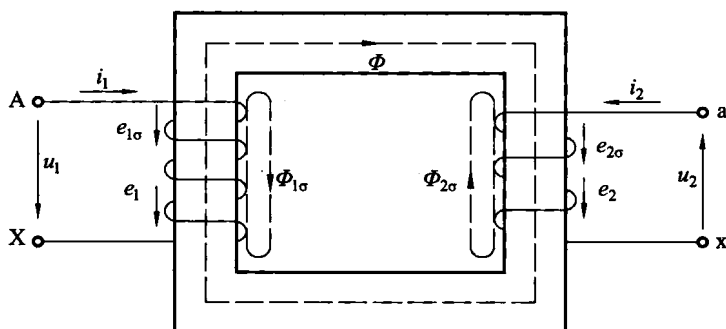


图 2.1 单相双绕组变压器原理图

与电源相连的绕组，接受交流电能，通常称为原边绕组（初级绕组、一次绕组），以 A、X 标注其出线端；与负载相连的绕组，送出交流电能，通常称为副边绕组（次级绕组、二次绕组），以 a、x 标注其出线端。原边的匝数、电压、电动势、电流分别以 n_1 、 u_1 、 e_1 、 i_1 来表示；副边的匝数、电压、电动势、电流分别以 n_2 、 u_2 、 e_2 、 i_2 来表示。

当原边绕组接通电源时，便会在铁芯中产生与电源电压同频率的交变磁通。若忽略漏磁，

该磁通便同时与原、副边绕组相交链，耦合系数 $k_c=1$ ，这样的变压器称为理想变压器。根据电磁感应定律，可写出电压、电动势的瞬时方程式分别为

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= -e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 &= e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

于是可得电动势比为

$$\left| \frac{u_1}{u_2} \right| = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

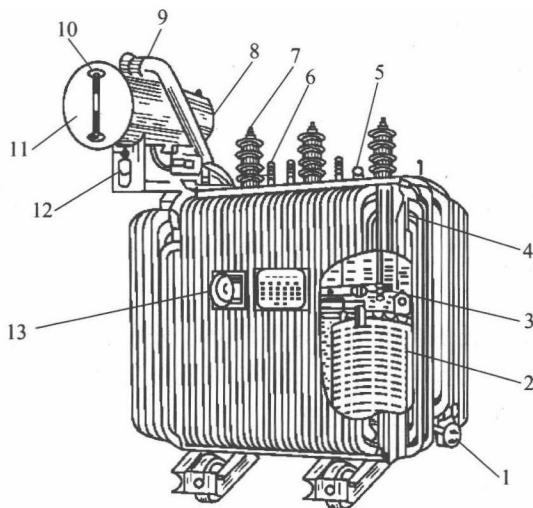
若磁通、电动势均按正弦规律变化， k 称为变压器的变比，也称为匝比，通常用有效值之间的比值来表示，即

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k \quad (2.2)$$

式 (2.2) 表明，变压器一、二次绕组的电压比就等于一、二次绕组的匝数比。因此，要使一、二次绕组有不同的电压，只要使一、二次绕组有不同的匝数即可。

二、变压器的基本结构

变压器的主要结构部件有铁芯、绕组（铁芯和绕组两个基本部分组成变压器的器身）以及放置器身且盛满变压器油的油箱。此外，还有一些为确保变压器运行安全的辅助器件。图 2.2 为一台油浸式电力变压器的外形图。



1—放油阀门；2—绕组；3—铁芯；4—油箱；5—分接开关；6—低压套管；7—高压套管；
8—气体继电器；9—安全气道；10—油表；11—储油柜；12—吸湿器；13—湿度计

图 2.2 油浸式电力变压器外形

(一) 铁 芯

表面具有绝缘膜的硅钢片铁芯由铁芯柱和铁轭两部分组成，是构成变压器磁路的主要部分。为了减小交变磁通在铁芯中引起的损耗，铁芯通常用厚度为 $0.3\sim 0.5\text{ mm}$ 的硅钢片叠装而成。图 2.3 (a)、(b) 所示的变压器，从外面看，线圈包围铁芯柱，称为心式结构；图 2.4 所示的变压器，从外面看，铁芯柱包围线圈，称为壳式结构。小容量变压器多采用壳式结构。交变磁通在铁芯中引起涡流损耗和磁滞损耗，为使铁芯的温度不致太高，在大容量的变压器的铁芯中往往设置油道，而铁芯则浸在变压器油中，当油从油道中流过时，可将铁芯中产生的热量带走。

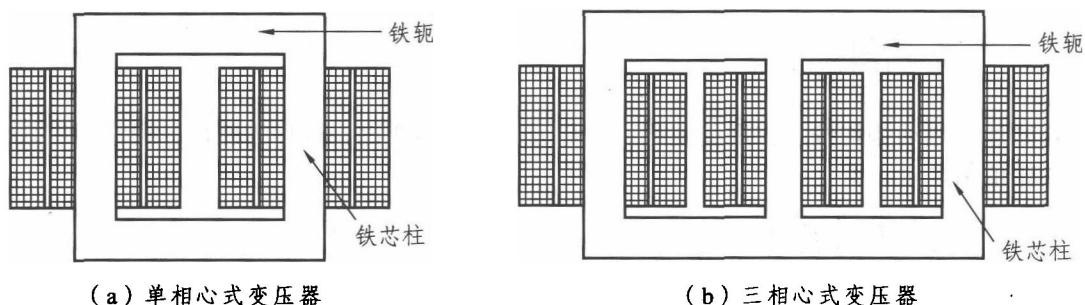


图 2.3 芯式结构变压器

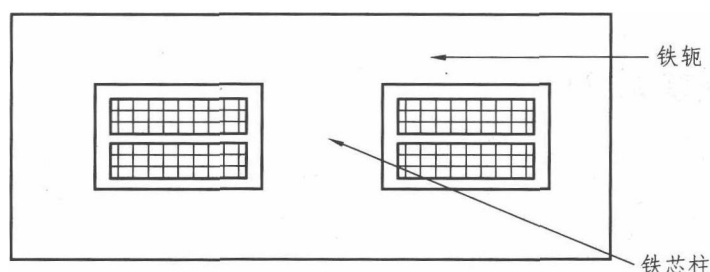


图 2.4 壳式结构变压器

(二) 绕 组

绕组构成变压器电路的主要部分。原、副边绕组一般用铜或铝的绝缘导线缠绕在铁芯柱上。高压绕组电压高，绝缘要求高，如果高压绕组在内，离变压器铁芯近，则应加强绝缘，这将提高变压器的成本造价。因此，为了绝缘方便，一般将低压绕组紧靠着铁芯，高压绕组则套装在低压绕组的外面。两个绕组之间留有油道，既可以起绝缘作用，又可以使油把热量带走。在单相变压器中，高、低压绕组均分为两部分，分别缠绕在两个铁芯柱上，两部分既可以串联又可以并联。三相变压器中属于同一相的高、低压绕组全部缠绕在同一铁芯柱上。

只有绕组和铁芯的变压器称为干式变压器。

大容量变压器的器身放在盛有绝缘油的油箱中，这样的变压器称为油浸式变压器。

(三) 其他结构部件

变压器的器身放在装有变压器油的油箱内。变压器油既是一种绝缘介质，又是一种冷却介质。为使变压器油能长久地保持良好状态，在变压器油箱上面装有圆筒形的储油柜。储油

柜通过连通管与油箱相通，柜内油面高度随着油箱内变压器油的热胀冷缩而变动，储油柜使油与空气的接触面积减小，从而减少油的氧化和水分的侵入。另外气体继电器和安全气道是在故障时保护变压器安全的辅助装置。

三、变压器的额定值

按照国家标准规定，标注在铭牌上的、代表变压器在规定使用环境和运行条件下的主要技术数据，称为变压器的额定值（或称为铭牌数据）。变压器的主要额定值有以下几项。

(1) 额定容量：变压器在正常运行时的视在功率，通常以 S_N 来表示，单位为伏安 ($V \cdot A$) 或千伏安 ($kV \cdot A$)。对于一般的变压器，原、副边的额定容量都设计成相等。

(2) 额定电压：在正常运行时，规定加在原边绕组上的电压，称为原边的额定电压，以 U_{1N} 来表示；当副边绕组开路（即空载）、原边绕组加额定电压时，副边绕组的测量电压即为副边额定电压，以 U_{2N} 来表示。在三相变压器中，额定电压系指线电压，单位为伏 (V) 或千伏 (kV)。

(3) 额定电流：根据额定容量和额定电压计算出来的电流值。原、副边的额定电流分别用 I_{1N} 、 I_{2N} 来表示，单位为安 (A)。

(4) 额定频率：我国以及大多数国家都规定 $f_N = 50 \text{ Hz}$ 。

额定容量、额定电压和额定电流之间的关系如下：

$$S_N = I_{1N} U_{1N} = I_{2N} U_{2N} \quad (\text{单相变压器})$$

$$S_N = \sqrt{3} I_{1N} U_{1N} = \sqrt{3} I_{2N} U_{2N} \quad (\text{三相变压器})$$

此外，变压器铭牌上一般还会标注效率、温升、绝缘等级等参数。

第二节 变压器的空载运行

变压器的原边绕组接在电网上、副边绕组开路时的运行状态，称为空载运行。此时， $i_2 = 0$ ，变压器内部的物理过程比较简单，下面先从变压器这样一个最简单的情况来研究其电磁过程。

一、空载运行时的物理状况

变压器的各电磁量都是交流量，为分析和计算方便，必须规定出其正方向。图 2.5 所示变压器各量的正方向是遵循惯例、按下面所述的相应电磁规律来规定的。

(1) u_1 、 u_2 ： u_1 的正方向规定由首端指向末端； u_2 的正方向规定从末端指向首端。

(2) Φ_m 、 Φ_o ：其正方向与产生它们的电流符合右手螺旋定则。因此，判定磁通的正方向时必须注意绕组的绕向。

(3) e_1 、 $e_{1\sigma}$ 和 e_2 、 $e_{2\sigma}$ ：正方向与产生它们的磁通符合右手螺旋定则，即符合电磁感应定律：

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

(4) i_1 、 i_2 ：正方向与相应的电势方向一致。

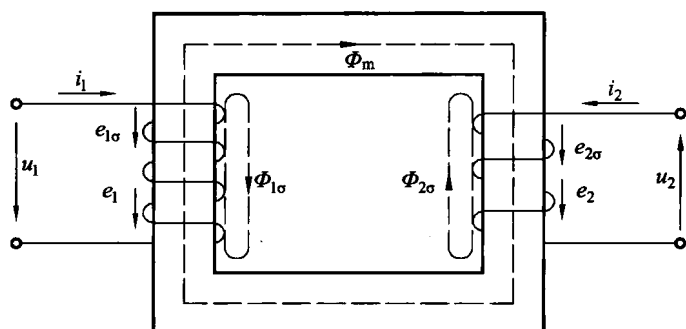


图 2.5 变压器工作原理示意图

变压器空载时各量的正方向规定与上述类似，如图 2.6 所示。

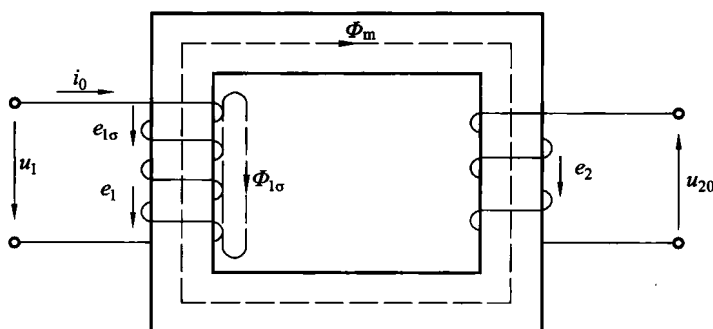


图 2.6 变压器空载运行原理图

变压器在空载运行时，原边绕组 N_1 接入电压为 u_1 的电网后，便会有空载电流 i_0 流过，进而产生空载交变磁势 $F_0 = i_0 N_1$ ，建立空载磁场。磁场由两部分磁通组成：因为铁芯磁导率比油或空气的磁导率大得多，绝大部分磁通存在于铁芯中，这部分磁通同时与原边、副边绕组相交链，称为主磁通 Φ_m ；少量的磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 只与原边绕组相交链，称为原边侧漏磁通。由于主磁通同时与原边、副边绕组相交链，因此从原边侧到副边侧的能量传递主要是依靠主磁通的媒介而实现的。

选择图 2.6 所示的正方向，根据基尔霍夫第二定律（KVL）及电磁感应定律，可得

$$u_1 = i_0 r_1 - e_{1\sigma} - e_1 = i_0 r_1 + N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_m}{dt}$$

$$u_{20} = e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_m}{dt}$$

如果各物理量均按正弦规律变化，便可用如下的相量形式来表示：

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_0 r_1 - \dot{E}_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$

（一）感应电动势

首先研究主磁通所产生的感应电动势。由于漏磁通远小于主磁通，故 $e_{1\sigma} < e_1$ ，空载时的

原边绕组压降也很小。忽略这两者（它们之和只有 u_1 的 0.2% 左右）的影响时，可认为 $u_1 \approx e_1$ 。可见当 u_1 为正弦波时， e_1 和 Φ_m 也按正弦规律变化。

设 $\Phi_m = \Phi_m \sin \omega t$ ，则

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} = -\omega N_1 \Phi_m \cos \omega t = \omega N_1 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \sqrt{2} E_1 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

$$e_2 = -N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} = \omega N_2 \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \sqrt{2} E_2 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

e_1 、 e_2 的有效值分别为

$$E_1 = \frac{\omega N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_1 \Phi_m$$

$$E_2 = \frac{\omega N_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 f N_2 \Phi_m$$

相应的相量表达式为

$$\dot{E}_1 = -j 4.44 f N_1 \dot{\Phi}_m$$

$$\dot{E}_2 = -j 4.44 f N_2 \dot{\Phi}_m$$

由上式可以看出， $\dot{E}_1$ 和 $\dot{E}_2$ 在相位都比产生它们的磁通 $\dot{\Phi}_m$ 滞后 90° 。由以上分析可以得到 $\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$ ， k 称为变压器的变比。由此可见，只要选择适当的原边、副边绕组匝数，就可

以产生所需要的电压。考虑到 $u_1 \approx e_1$ ，于是有

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

实际上变压器在空载运行时，存在少量的与原边绕组相交链的漏磁链 $\Phi_{1\sigma}$ ，它也是随时间交变的，因而也会在原边绕组中感应产生漏电动势 $e_{1\sigma}$ ，下面对其进行分析。

由于漏磁通的路径大部分在磁导率比较小的空气或油中，它一般不会饱和，可以认为漏磁通 $\Phi_{1\sigma}$ 与空载电流 i_0 成正比，所以 $\Phi_{1\sigma}$ 是一常数。于是可得漏磁通产生的感应电动势为

$$e_{1\sigma} = -N_1 \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} = -L_{1\sigma} \frac{di_0}{dt}$$

当 i_0 按正弦规律变化时，上式可以写成相量形式：

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j \omega L_{1\sigma} \dot{i}_0 = -j X_{1\sigma} \dot{i}_0$$

（二）空载电流

变压器的空载电流 i_0 一方面建立磁场，另一方面要补偿空载运行时变压器的损耗。前者仅起磁化作用，称为励磁电流或磁化电流，是 i_0 中的无功分量，以 i_m 表示；后者是有功分量，以 i_{Fe} 表示。因此， $i_0 = i_m + i_{Fe}$ 。一般来说， i_{Fe} 极小，为简化起见，常忽略 i_{Fe} ，将 i_0 看成励磁电流，即 $i_0 \approx i_m$ 。

由于变压器的铁芯材料是铁磁物质，有磁饱和现象存在，其饱和程度对 i_0 的大小、波形都有一定的影响。