



自动控制实践I-11

- 变压器及其应用



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



目 录

1. 变压器运行原理

- 变压器概述
- 变压器的空载/负载运行
- 变压器的等效电路
- 变压器的运行

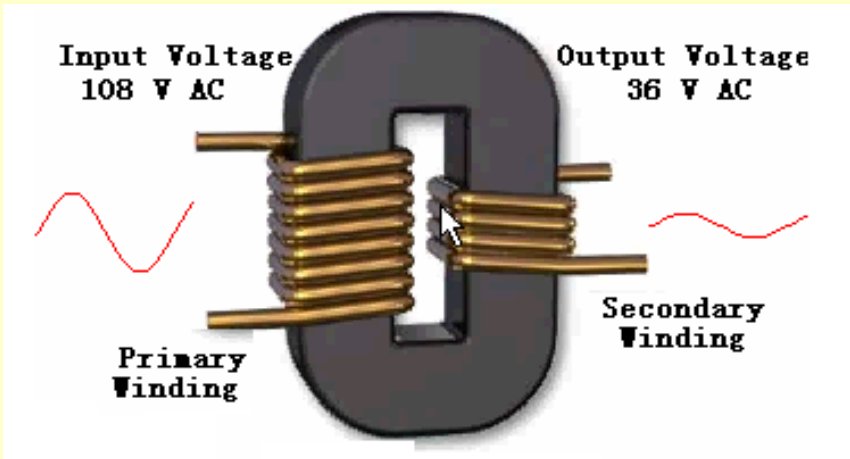
2. 变压器不同场合的应用

- 自耦变压器
- 电压/电流互感器
- 日常生活中的变压器
- 阻抗变换
- 隔离变压器

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.1 变压器概述



1.1 变压器概述

电力变压器



三相干式变压器



电源变压器



开关电源变压器



接触调压器



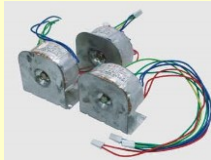
控制变压器



旋转变压器



电流互感器



1.1 变压器概述

变压器的用途

1. 电力变压器主要用于电力系统升高或降低电压。
2. 仪用变压器一般指电流互感器和电压互感器，将大电流变为小电流，将高电压变为低电压以便常规仪器测量。
3. 调压变压器可用来调节电压，实验室常用。
4. 在电子电路中，变压器常用来变换阻抗。
5. 在自动控制系统中，变压器还可用来变换极性、传输脉冲，测量角度等。
6. 隔离变压器用于抑止电控系统的传导干扰。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.1 变压器概述

变压器的分类

- (1) 按用途：电力变压器、电源变压器、仪用变压器、电子变压器（用在电子线路中）、电流互感器、电压互感器等；
- (2) 按相数：单相变压器、三相变压器；
- (3) 按频率：高频变压器（开关电源）、中频变压器（中频加热、淬火）、工频变压器；
- (4) 按冷却介质：油浸变压器、干式变压器、水冷变压器；
- (5) 按铁心形式：心式变压器、壳式变压器；
- (6) 按绕组数：双绕组变压器、多绕组变压器、自耦变压器

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



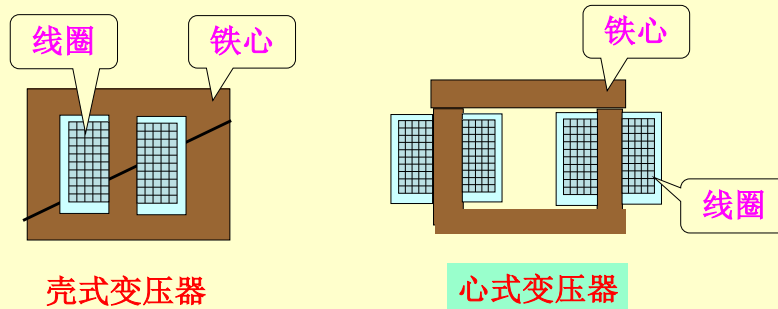
1.1 变压器概述

变压器的结构

变压器铁心: 硅钢片叠压而成。

变压器绕组: 高强度漆包线绕制而成。

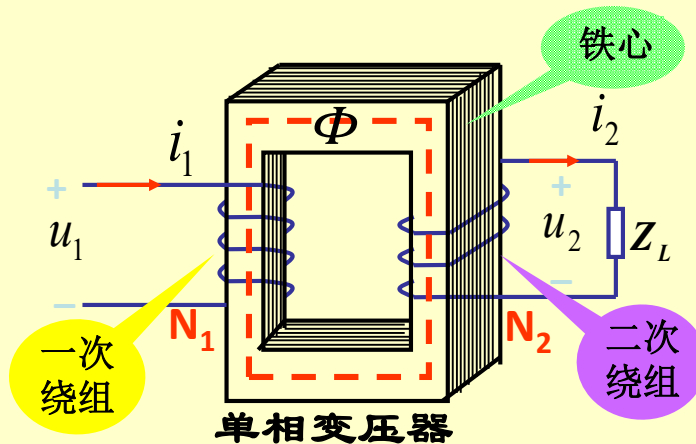
其他部件: 油箱、冷却装置、保护装置等。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.2 变压器的空载与负载运行



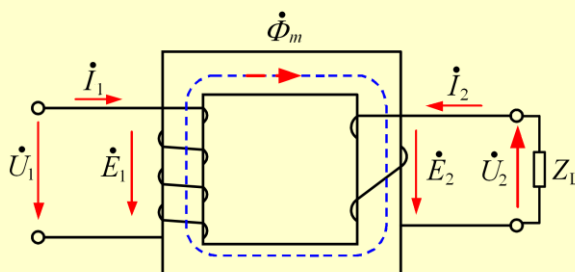
一次、二次绕组互不相连，能量的传递靠磁耦合。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.2 变压器的空载与负载运行

变压器各电磁量正方向



- ✳ 磁通正方向与电流正方向之间符合右手螺旋关系；
- ✳ 感应电动势与同回路电流同方向；
- ✳ 在同回路内，电压与电流的正方向一致。

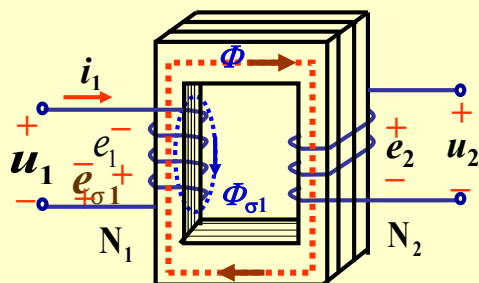
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.2 变压器的空载与负载运行

1. 电磁关系

(1) 空载运行情况



空载时，铁心中主磁通 Φ 是由一次绕组磁通势产生的。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

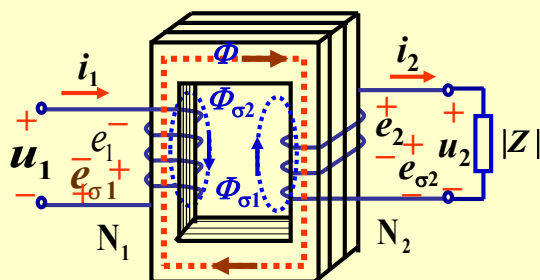


1.2 变压器的空载与负载运行

1. 电磁关系

(2) 负载运行情况

一次侧接交流电源，
二次侧接负载。



负载时，铁心中主磁通 Φ 是由一次、二次绕组磁通势共同产生的合成磁通。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.2 变压器的空载与负载运行

2. 电压关系

(1) 一次、二次侧主磁通感应电动势

主磁通按正弦规律变化，设为 $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ ，则

$$\begin{aligned} e_1 &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 \frac{d}{dt} (\Phi_m \sin \omega t) \\ &= -N_1 \omega \Phi_m \cos \omega t = E_{1m} \sin (\omega t - 90^\circ) \end{aligned}$$

$$e_2 = E_{2m} \sin (\omega t - 90^\circ)$$

$$\text{有效值: } E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} \quad \begin{aligned} E_1 &= 4.44 f \Phi_m N_1 \\ E_2 &= 4.44 f \Phi_m N_2 \end{aligned}$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.2 变压器的空载与负载运行

(2) 一次侧电压平衡方程

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= R_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{E}_1 \\ &= R_1 \dot{I}_1 + j X_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_1\end{aligned}$$

式中 R_1 为一次侧绕组的电阻;

$X_1 = \omega L_{\sigma 1}$ 为一次侧绕组的感抗(漏磁感抗, 由漏磁产生)。

由于电阻 R_1 和感抗 X_1 (或漏磁通)较小,其端电压简化分析时可忽略:

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1 \rightarrow U_1 \approx E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.2 变压器的空载与负载运行

(3) 二次侧电压平衡方程

$$\begin{aligned}\dot{E}_2 &= R_2 \dot{I}_2 - \dot{E}_{\sigma 2} + \dot{U}_2 \\ &= R_2 \dot{I}_2 + j X_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2\end{aligned}$$

式中 R_2 为二次绕组的电阻;

$X_2 = \omega L_{\sigma 2}$ 为二次绕组的感抗;

\dot{U}_2 为二次绕组的端电压。

变压器空载时 $I_2 = 0$, $U_2 = U_{20} = E_2 = 4.44 f \Phi_m N_2$

式中 U_{20} 为变压器空载电压。

$$\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K \quad K \text{ 为变比/匝比}$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.2 变压器的空载与负载运行

不论空载还是有载，一次绕组上的阻抗压降一般可忽略：

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$$

由上式，若 U_1 、 f 不变，则 Φ_m 基本不变，近于常数。

3. 电流关系

负载运行 $Z_2 \rightarrow \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2}$

铁心中主磁通的最大值 Φ_m 在变压器空载和有载时近似保持不变。即有

空载： $i_0 N_1 \rightarrow \Phi_m$ 负载： $i_1 N_1 + i_2 N_2 \rightarrow \Phi_m$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.2 变压器的空载与负载运行

磁势平衡式： $i_1 N_1 + i_2 N_2 = i_0 N_1$

有载磁势

空载磁势

或： $i_1 N_1 = i_0 N_1 - i_2 N_2$ $\left\{ \begin{array}{l} 1. \text{提供产生 } \Phi_m \text{ 的磁势} \\ 2. \text{提供用于补偿 } i_2 N_2 \text{ 作用的磁势} \end{array} \right.$

一般情况下： $I_0 \approx (2\sim3)\% I_{1N}$ 很小可忽略。

所以 $I_1 N_1 \approx I_2 N_2$



$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路

变压器的基本方程：

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_{2\sigma} + \dot{U}_2$$

$$\frac{\dot{E}_1}{\dot{E}_2} = k$$

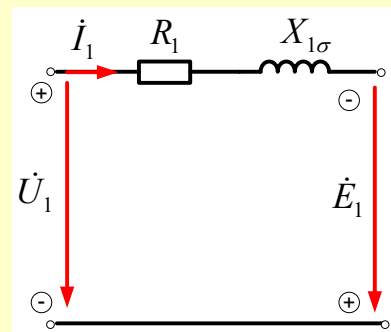
$$N_1 \dot{I}_1 + N_2 \dot{I}_2 = N_1 \dot{I}_m$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$$



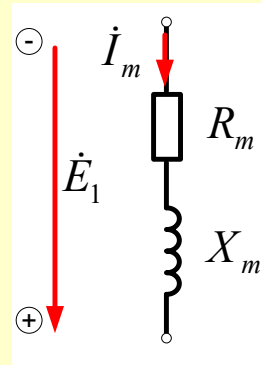
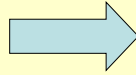
一次侧绕组等效电路

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m$$

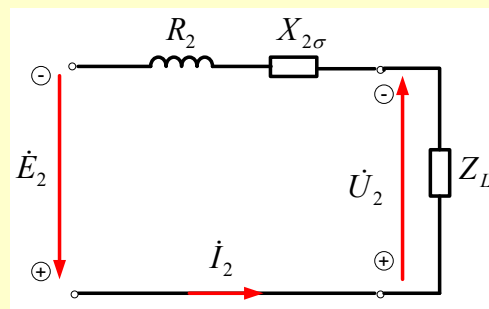


激磁电路



1.3 变压器的等效电路

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_{2\sigma} + \dot{U}_2$$

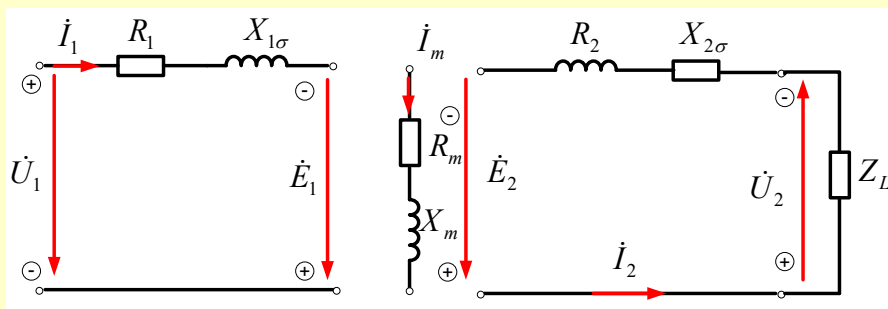


二次侧绕组等效电路



1.3 变压器的等效电路

三、绕组归算



使新的二次绕组的电势等于一次绕组的电势，即

$$\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路

什么是绕组归算？

假设一个新的二次绕组替代原二次绕组，新的二次绕组的匝数等于一次绕组的匝数，同时一次和二次绕组的原有电磁关系不变。这叫做“归算”。

具体反映在两个“不变”的原则上：

- 归算后二次绕组的磁动势保持不变。
- 归算后功率、能量不变。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路

由于主磁通不变，因而：

$$\frac{\dot{E}'_2}{\dot{E}_2} = \frac{N_1}{N_2} = k$$

$$\dot{E}'_2 = k\dot{E}_2$$

由磁动势不变可以得到：

$$N_1 \dot{I}'_2 = N_2 \dot{I}_2$$

$$\dot{I}'_2 = \frac{N_2}{N_1} \dot{I}_2 = \frac{1}{k} \dot{I}_2$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路

现在看方程式的变化：

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_{2\sigma} + \dot{U}_2$$

$$k\dot{E}_2 = k(\dot{I}_2 Z_{2\sigma} + \dot{U}_2) = k\dot{I}_2 (R_2 + jX_{2\sigma}) + k\dot{U}_2$$

$$= \frac{\dot{I}_2}{k} (k^2 R_2 + jk^2 X_{2\sigma}) + k\dot{U}_2$$

$$= \dot{I}'_2 (R'_2 + jX'_{2\sigma}) + \dot{U}'_2$$

$$R'_2 = k^2 R_2$$

$$X'_{2\sigma} = k^2 X_{2\sigma}$$

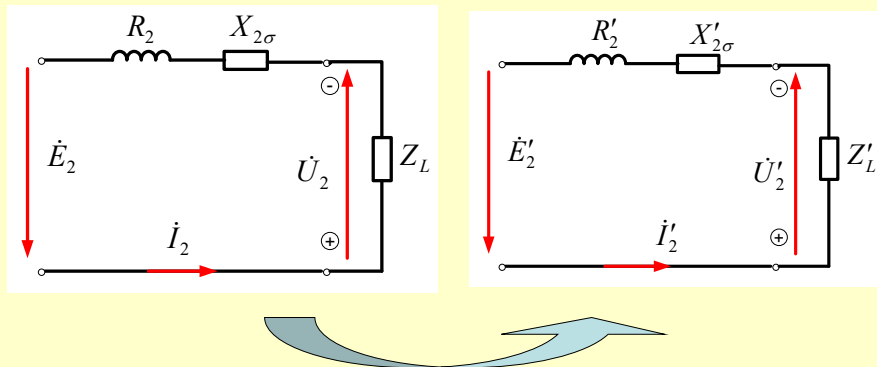
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路

得到:

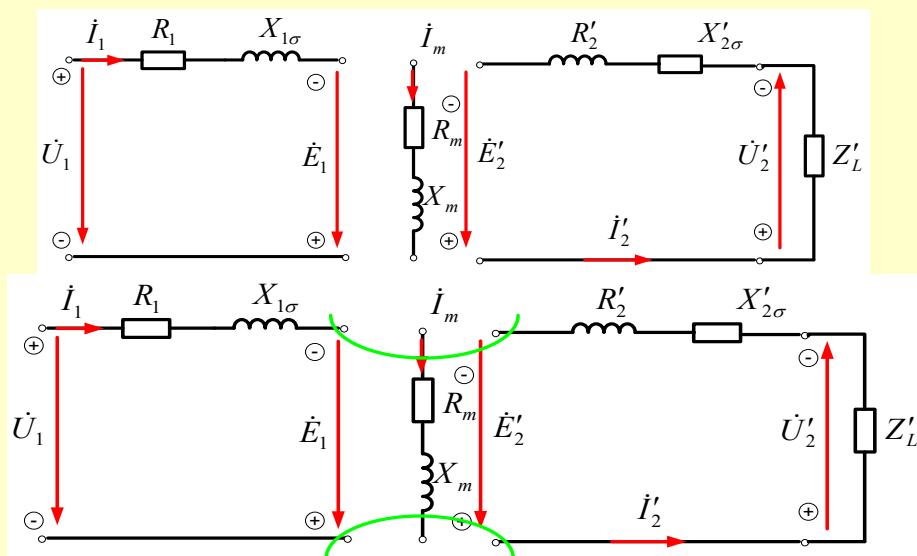
$$E'_2 = k\dot{E}_2 = \dot{I}'_2(R'_2 + jX'_{2\sigma}) + \dot{U}'_2 = E_1$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路

四、归算后，变压器的基本方程为：

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_{1\sigma} - \dot{E}_1$$

$$\dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + \dot{I}_2'$$

$$\dot{E}_2' = \dot{I}_2' (R_2' + jX_{2\sigma}') + \dot{U}_2'$$

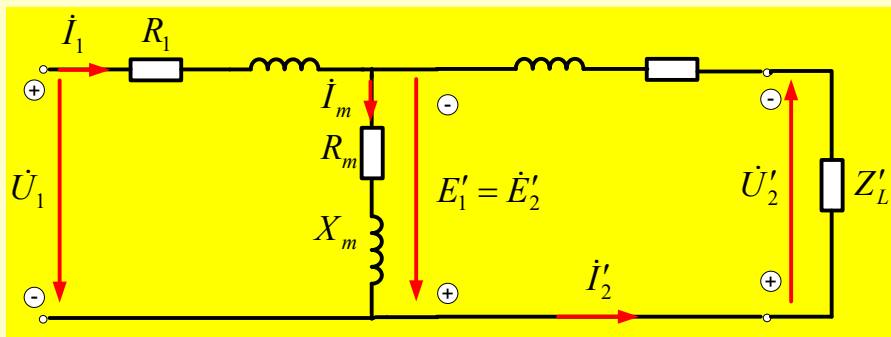
$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_m$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路

五、归算后，T型等效电路



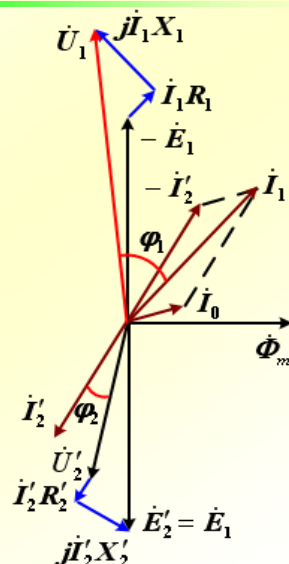
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路

假定给定 U_2 、 I_2 、 $\cos\varphi_2$ 及各个参数

- (1) 画出 \dot{U}'_2 、 \dot{I}'_2 ；
- (2) 在 \dot{U}'_2 相量上加上 $\dot{I}'_2 R'_2 + j\dot{I}'_2 X'_2$ 得到 \dot{E}'_2 ；
- (3) $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$
- (4) 画出领先 \dot{E}_1 90° 的主磁通 $\dot{\Phi}_m$ ；
- (5) 根据 $\dot{I}_0 = -\dot{E}_1 / Z_m$ 画出 \dot{I}_0 ，
 \dot{I}_0 领先 $\dot{\Phi}_m$ 一个铁耗角；
- (6) 画出 $-\dot{I}'_2$ 与 \dot{I}_0 的相量和 \dot{I}_1 ；
- (7) 画出 $-\dot{E}_1$ ，加 $\dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1$ 得到 \dot{U}_1 。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.3 变压器的等效电路

单相变压器基本分析方法

计算变压器负载运行方法有基本方程式、等效电路和相量图。

基本方程式：是变压器的电磁关系的数学表达式；

等效电路：是基本方程式的模拟电路；

相量图：是基本方程的图示表示；

三者是统一的，一般定量计算用等效电路或方程式，讨论各物理量之间的相位关系用相量图。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.4 变压器的运行

- **额定容量 S_N** : 额定工作状态下的视在功率, 用伏安 (VA) 等表示。
- **额定电压 U_{1N}/U_{2N}** : U_{1N} 是电源加到一次绕组上的额定电压, U_{2N} 是一次绕组加上额定电压后二次绕组开路, 即空载时二次绕组的端电压。对于三相变压器额定电压是指线电压。
- **额定电流 I_{1N} 、 I_{2N}** : 变压器额定容量分别除以原、副边额定电压所计算出来的线电流值。是变压器满载运行时, 一次、二次侧绕组允许的电流值。
- **额定频率**: 按我国规定, 工业用电 50Hz。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.4 变压器的运行

- 额定容量 S_N 传送功率的最大能力。

$$\begin{cases} \text{单相: } S_N = U_{2N} I_{2N} \approx U_{1N} I_{1N} \\ \text{三相: } S_N = \sqrt{3} U_{2N} I_{2N} \approx \sqrt{3} U_{1N} I_{1N} \end{cases}$$

注意: 变压器几个功率的关系 (单相)

$$\begin{cases} \text{一次侧输入功率: } P_1 = U_1 I_1 \cos \phi_1 \\ \text{输出功率: } P_2 = U_2 I_2 \cos \phi \end{cases}$$

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta}$$

效率

容量 $S_N \neq$ 输入功率 P_1

一次侧输入功率 $P_1 \neq$ 输出功率 P_2

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.4 变压器的运行

(1) 外特性。是指电源电压和负载的功率因数为常数时，二次侧端电压随负载电流变化的规律。

(2) 效率特性。是指电源电压和负载的功率因数为常数时，变压器的效率随负载电流变化的规律。

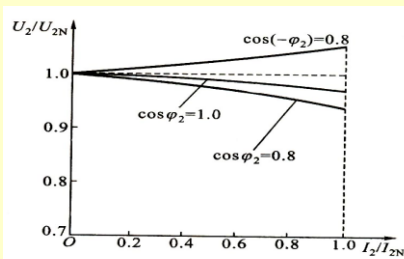


图 2-9 变压器的外特性

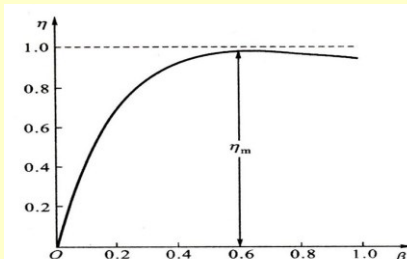


图 2-10 变压器的效率曲线

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

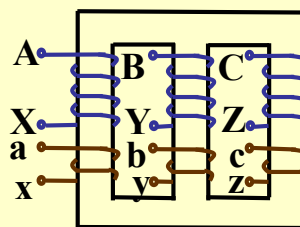


1.4 变压器的运行

1) 三相变压器的结构

高压绕组: A、B、C：首端
A-X B-Y C-Z X、Y、Z：尾端

低压绕组: a、b、c：首端
a-x b-y c-z x、y、z：尾端



2) 三相变压器的联结方式

联结方式: Y/Y、Y/Y₀、Y₀/Y、Y/Δ、Y₀/Δ

常用接法: Y/Y₀: 三相配电变压器

高压绕组接法

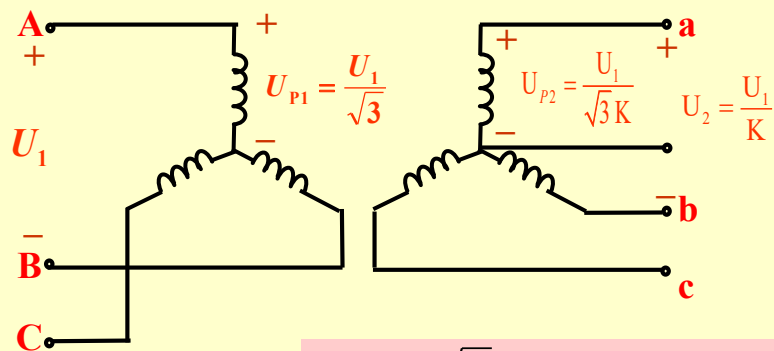
低压绕组接法

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



1.4 变压器的运行

三相变压器Y/Y₀联结



线电压之比:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3} U_{P1}}{\sqrt{3} U_{P2}} = \frac{U_{P1}}{U_{P2}} = K$$

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



目 录

1. 变压器运行原理

- 变压器概述
- 变压器的空载/负载运行
- 变压器的等效电路
- 变压器的运行

2. 变压器不同场合的应用

- 自耦变压器
- 电压/电流互感器
- 日常生活中的变压器
- 阻抗变换
- 隔离变压器

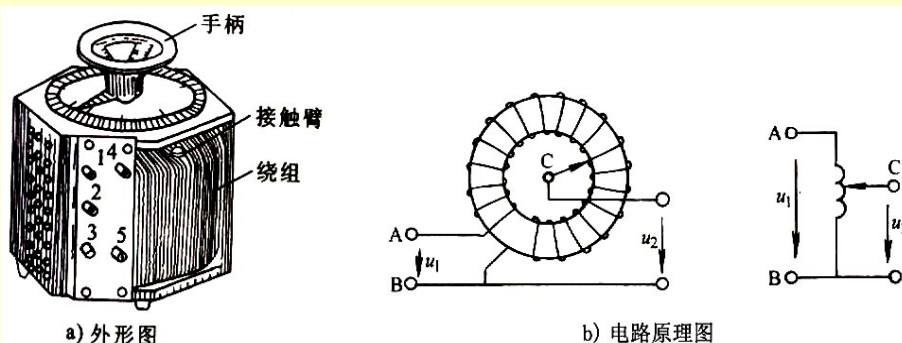
哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 变压器不同场合的应用

自耦调压器

低压小容量的自耦变压器，其二次绕组的接头C常做成沿线圈自由滑动的触头，它可以平滑地调节自耦变压器的二次绕组电压，这种自耦变压器称为自耦调压器。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心

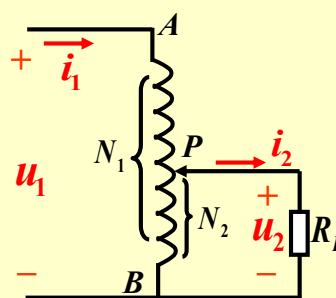


2. 变压器不同场合的应用

自耦变压器原理

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

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$



使用时，改变滑动端的位置，便可得到不同的输出电压。
实验室中用的调压器就是根据此原理制作的。**注意：一次、二次侧千万不能对调使用。**

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 变压器不同场合的应用

自耦变压器的特点

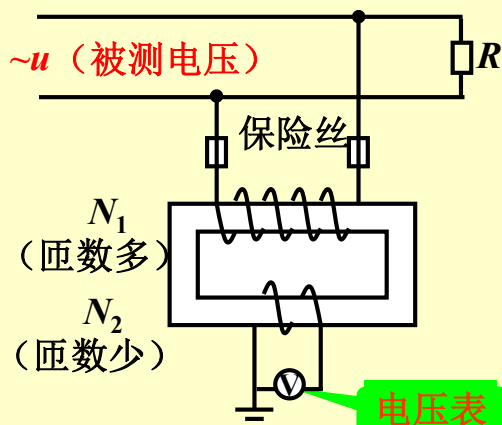
自耦变压器具有结构简单、节省用铜量、其效率比一般变压器高等优点。

其缺点是一次侧、二次侧电路中有电的联系，可能发生把高电压引入低压绕组的危险事故，很不安全，因此要求自耦变压器在使用时必须正确接线，且外壳必须接地，并规定安全照明变压器不允许采用自耦变压器结构形式。



2. 变压器不同场合的应用

2.电压互感器--实现用低量程的电压表测量高电压



使用注意事项:

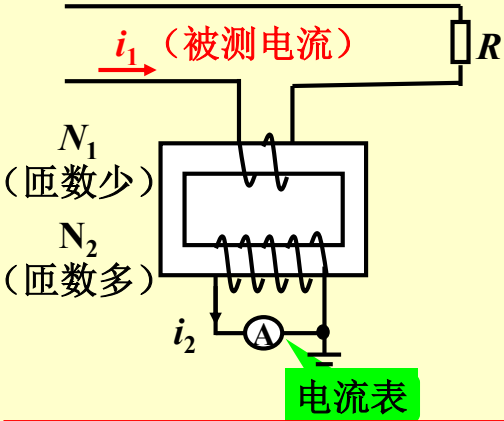
1. 二次侧不能短路，以防产生过流；
2. 铁心、低压绕组的一端接地，以防在绝缘损坏时，在二次侧出现高压。

$$\text{被测电压} = \text{电压表读数} \times N_1/N_2$$



2. 变压器不同场合的应用

3. 电流互感器实现用低量程的电流表测量大电流



使用注意事项:

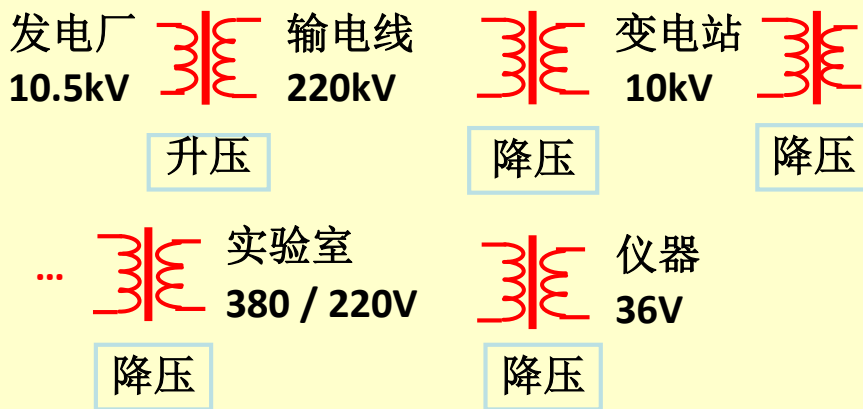
- 1. 二次侧不能开路，以防产生高电压；
- 2. 铁心、低压绕组的一端接地，以防在绝缘损坏时，在二次侧出现过压。

被测电流=电流表读数 $\times N_2/N_1$



2. 变压器不同场合的应用

电力工业中常采用高压输电低压配电，实现节能并保证用电安全。具体如下：



2. 变压器不同场合的应用

日常生活中使用的变压器

生活中需要各种电压的交流或直流电

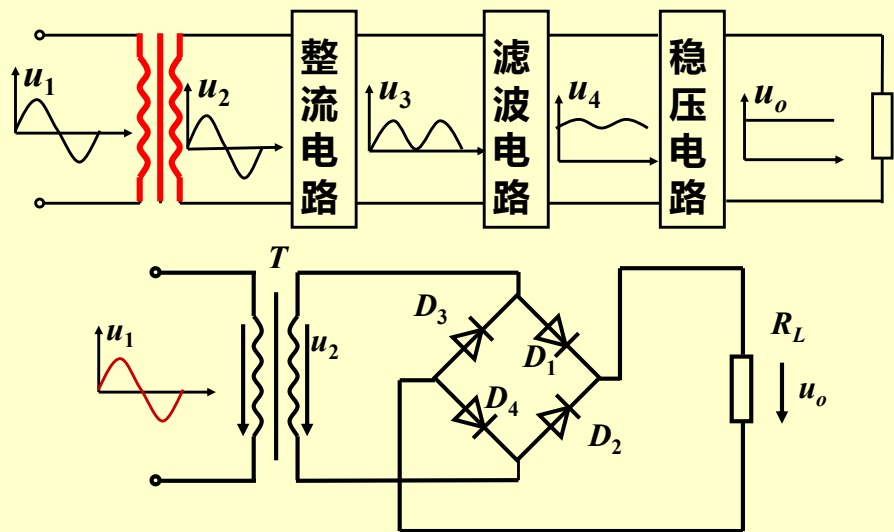
用电器	额定工作电压	用电器	额定工作电压
随身听	3V	机床上的照明灯	36V
扫描仪	12V	防身器	3000V
手机充电器	5 V	黑白电视机显像管	几万伏
录音机	6V 9V 12V	彩色电视机显像管	十几万伏



2. 变压器不同场合的应用



2. 变压器不同场合的应用



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 变压器不同场合的应用

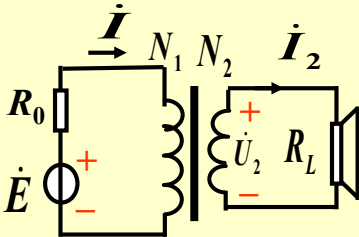
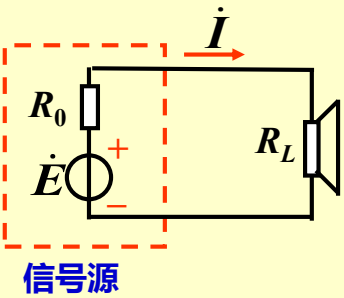
例：交流信号电源 $E = 120\text{V}$ ，内阻 $R_0 = 800\Omega$ ，负载为扬声器，其等效电阻为 $R_L = 8\Omega$ 。要求：

(1) 当 R_L 折算到原边，与信号源内阻相等时，求变压器的匝数比和信号源输出的功率；

(2) 当将负载直接与信号源联接时，信号源输出多大功率？

解：(1) 变压器的匝数比应为：

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{R'_L}{R_L}} = \sqrt{\frac{800}{8}} = 10$$



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 变压器不同场合的应用

信号源的输出功率:

$$P = \left(\frac{E}{R_0 + R'_L} \right)^2 \times R'_L = \left(\frac{120}{800 + 800} \right)^2 \times 800 = 4.5 \text{ W}$$

(2) 将负载直接接到信号源上时, 输出功率为:

$$P = \left(\frac{E}{R_0 + R_L} \right)^2 R_L = \left(\frac{120}{800 + 8} \right)^2 \times 8 = 0.176 \text{ W}$$

结论: 接入变压器以后, 输出功率大大提高。

原因: 满足了最大功率输出的条件: $R'_L = R_0$
电子线路中, 常利用阻抗匹配实现最大输出功率。

哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



2. 变压器不同场合的应用

隔离变压器:

- 1) 使一次侧与二次侧的电气完全绝缘, 一般使二次侧回路隔离浮地, 实现了强、弱电隔离或用电载荷与电网的隔离。
- 2) 利用变压器输入输出寄生电容耦合小, 和铁芯高频损耗大的特点, 抑制高频杂波传入电网与其它控制回路。



哈尔滨工业大学航天学院 控制与仿真中心



致 谢

本文档所引用的许多素材，来源于互联网上国内外的课件、科技论文、文章、网页等。本文引用只是为了给学生提供更好的教学素材，非商业目的。对这些所引用素材的原创者，在此表示深深的谢意。

