

变 压 器 连 接 组

韩忠民 编



机 械 工 业 出 版 社

变压器的连接方式是变压器同一侧线圈的连接方法，变压器的相位移组别是不同侧线圈间电压相位移的时钟小时数。变压器的连接组就是由连接方式组合和相位移组别二者组成的。

本书从基本概念出发，系统地叙述了各种正常连接方式和特种连接方式；详细地说明了线圈间电压的相位关系；全面地讨论了确定连接组的方法（线电压法和线电压重心重合法）及其变换规律。此外，还通俗地介绍了连接组的测量方法和连接方式对变压器性能的影响。本书内容完整，层次清晰，可供从事变压器制造、试验、运行和检修的工人阅读，也可供工程技术人员和院校学生参考。

变压器连接组

韩忠民 编

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/32} \cdot 3^0/16$ 印张·字数 71 千字

1984 年 9 月北京第一版·1984 年 9 月北京第一次印刷

印数 00,001—13,800·定价 0.52 元

*

统一书号：15033·5578

前 言

顾名思义，所谓变压器就是用来改变电压的一种传输交流电能的静止电器。既然是改变电压，那末就必然包括两个方面，一是电压的大小，二是电压的相位。表示电压大小关系的是变压比，而表示电压相位关系的就是相位移组别了。讨论变压器的连接组，主要就是讨论变压器不同侧线圈间电压的相位关系，也就是讨论电压相量之间夹角的大小（通常称为相位移）。

因此，有关变压器连接组的问题，是从事变压器制造、试验、运行和检修的工人，首先要遇到的问题。

变压器的连接方式主要是指变压器同一侧线圈间的连接方法，所以也称为变压器线圈的连接方式。变压器不同侧线圈间电压的相位关系，可以用时钟法来表示，时钟的小时数就是电压相位移组别。变压器的连接方式组合与相位移组别合在一起称为连接组，而在区分连接组时称为连接组别。连接组是变压器的重要技术参数之一。

变压器的连接组并不复杂，许多工人对变压器的标准连接组，还是比较熟悉的，但是对一些不常见的连接方式，对于连接组别的变换往往会感到束手无策。这恐怕主要是由于缺乏有关变压器连接组方面的完整知识所造成的。

有关变压器连接组方面的材料，虽然在现有的各电机类书籍中都涉及到了，但是均不够详尽，也不够通俗易懂。

鉴于这样的情况，本书将深入浅出地详细论述有关变压器连接组的理论与实践，以期读者对此有一完整而清晰的概念。

IV

应该指出的是，工程上规定的连接组的标号中，线圈连接方式的标号是从高压向低压顺次排列的，所以把变压器线圈称为高压线圈和低压线圈，而不称为一次线圈和二次线圈，也不称为原边线圈和副边线圈。

确定变压器连接组别，目前有二种方法，一种是传统的线电压法，另一种是国际电工委员会（IEC）推荐的线电压重心重合法。后者比较直观，易于掌握。本书将详细地介绍这二种方法。

本书还详细地介绍了连接组别的变换规律及特种连接组。

在连接组别测量中，在介绍测量方法的同时，着重介绍它的测量原理，尤其是电桥法测量的原理。

崔立君同志对本书进行了审阅，并对各章均作了修改和补充，在此表示衷心的感谢。

目 录

一、有关变压器连接组的基础知识	1
1. 线圈在铁心柱上的布置	1
2. 线圈端子的标记	2
3. 线圈的绕向	3
4. 线圈感应电势的相位和极性	4
5. 线圈电压的相位和极性	7
6. 三相系统的相序	11
二、单相变压器的连接组	14
1. 相线圈的连接方式	14
2. 单相变压器连接组的表示方法	19
3. 单相变压器的连接组别	21
三、三相变压器的连接组	24
1. 线圈的连接方式	24
2. 三相双线圈变压器的连接组	28
3. 三相三线圈变压器的连接组	58
四、变压器连接组别的测量	61
1. 直流法	61
2. 交流法	63
3. 电桥法	67
五、变压器的特种连接方式与连接组	78
1. V/V 连接组合	78
2. T/T 连接组合	79
3. Y/开口 Δ 连接组合	80
4. Y/Y- Δ 连接组合	80
5. Δ /Y- Δ 连接组合	81

V

6. $\Delta/\Delta-\nabla$ 连接组合	81
7. $\nabla/\Delta-\nabla$ 连接组合	82
8. ∇ /双重 Z 连接组合	82
9. Δ /双重 Z 连接组合	84
10. T/1-1连接组合	85
11. Δ /特种 V 连接组合	85
12. 1-1/T-1连接组合	85
13. O-V连接组合	86
14. O-T连接组合	87
15. 外延 Δ/∇ 连接组合	87
16. O-外延 Δ 连接组合	88
六、常见连接组合的特性及应用	90
1. 双线圈变压器常见连接组合的特性及应用	92
2. 三线圈变压器和自耦变压器常见连接组合 的特性及应用	99

一、有关变压器连接组的基础知识

在讨论变压器线圈连接组之前，首先了解一下有关的基础知识，对掌握连接组的理论是非常必要的。

这些基础知识包括：线圈在铁心柱上的布置、线圈端子的标记、线圈的绕向、线圈感应电势的相位和极性、线圈电压的相位和极性以及三相系统的相序等等。

1. 线圈在铁心柱上的布置

变压器的线圈是套在铁心的心柱上的。线圈在铁心柱上的布置方式有同心式和交错式二种，如图 1 a、b 所示。

图 1 表示双线圈变压器的线圈在一个铁心柱上的布置情况。其中，高、低压线圈的位置有时是可以互换的。为了表示方便起见，这二种布置方式均可用图 1 c 的示意图或图 1 d 的简化示意图来表示；又为了清晰起见，把同心排列的或交错排列的线圈改为上下排列画出。在图 1 d 的简化示意图中，

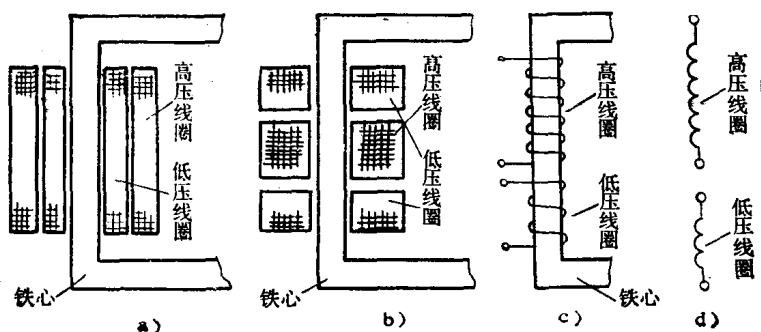


图 1 双线圈变压器的线圈在一个铁心柱上的布置及示意图

a) 同心式布置 b) 交错式布置 c) 示意图 d) 简化示意图

把铁心也省去了。多线圈变压器的线圈在铁心柱上的布置方式是与此类似的，见图 2（三线圈变压器）。

2. 线圈端子的标记

变压器的线圈均有二个端子，与电力系统相连接的一端称为线端，另一端称为末端。变压器的连接组与线圈端子的标记有直接的关系。在图 1 所示的线圈示意图中，既可以将线圈的上端作为线端，也可以将线圈的下端作为线端。如果线圈套在铁心柱上进行连接后，原则上也可把连线拆开，改变标记。但是，由于线圈两端绝缘水平的不同、分接区域不同、引出线位置的限定，则线圈的端子标记往往又是固定的、不变的。

国家标准 GB 1094—79 规定，高压线圈的端子用大写字母来标记，中压线圈的端子用大写字母加右下脚 m 来标记，低压线圈的端子用小写字母来标记。具体规定如下（参见图 2）：

高压线端为 A、B、C，末端为 X、Y、Z；

中压线端为 A_m 、 B_m 、 C_m ，末端为 X_m 、 Y_m 、 Z_m ；

低压线端为 a、b、c，末端为 x、y、z。

三相末端接在一起时的中性点端子，高、中、低压侧分

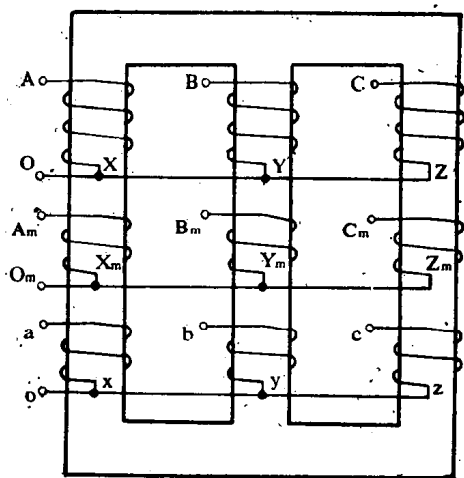


图 2 三相三线圈变压器的
线端和末端的标记

别以 $\odot$ 、 $\odot m$ 、 $\circ$ 来标记。

3. 线圈的绕向

已经绕好的线圈的绕向，是固定不变的。线圈的绕向就是线匝缠绕的方向。线圈的绕向有二种，一是左绕向，另一是右绕向。从线圈的端部向里看，线匝由线端或末端起，沿反时针方向缠绕的为左绕向，沿顺时针方向缠绕的为右绕向。

对于图 3 直立的线圈，面对上端向下看（图中所表示的情况），或面对下端向上看，线匝的缠绕方向，图 3 a 总是反时针缠绕的，是左绕向；图 3 b 总是顺时针缠绕的，是右绕向。由于左绕向的线圈绕制时比较方便，所以一般多采用左绕向。

这里顺便提一下右手定则，因为它是决定变压器的电流 I 和磁通 Φ 关系的依据。如果已知绕向和电流方向，那末

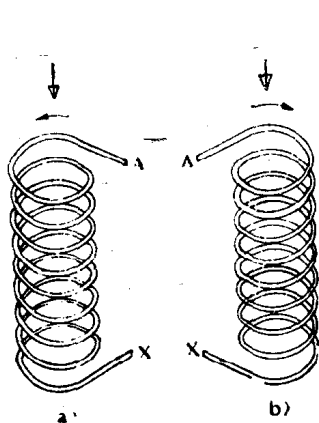


图 3 线圈的绕向

a) 左绕向 b) 右绕向

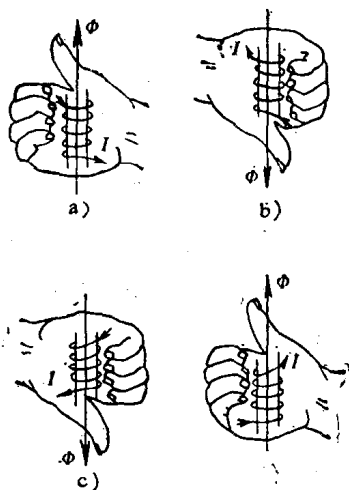


图 4 用右手定则判定电流 I 和磁通 Φ 方向的关系

以四指的方向符合于绕向和电流的方向，则拇指所指的方向就是磁通的方向；如果已知绕向和磁通方向，也可由四指推知电流的方向。它共有四种情况（如图4）：

图4 a 中，线圈为左绕向，电流自上流入，则磁通方向向上；所以磁通向上，则电流必自上流入；

图4 b 中，线圈为左绕向，电流自下流入，则磁通方向向下；所以磁通向下，则电流必自下流入；

图4 c 中，线圈为右绕向，电流自上流入，则磁通方向向下；所以磁通向下，则电流必自上流入；

图4 d 中，线圈为右绕向，电流自下流入，则磁通方向向上；所以磁通向上，则电流必自下流入。

4. 线圈感应电势的相位和极性

线圈的绕向和端子标记决定了同一铁心柱上高、低压线圈感应电势的相位关系。这种相位关系通常又称为极性关系。

同一铁心柱上的线圈仅与同一磁通交链。虽然在线圈内感应电势是交变的，但当—个线圈某—端的瞬时电位为高电位（或低电位）时，另一个线圈必然同时有一对应端电位为高电位（或低电位）。电位对应的端子也就是极性相同的端子，它称为同极性端，用符号“*”表示。

二个线圈线端的极性相同称为同极性的，极性相反称为反极性的。

线圈感应电势的方向是由低电位指向高电位的，而它所产生的感应电流的方向也是由低电位流向高电位的。所以线圈感应电势的方向总是与感应电流的方向一致的，也就是由感应电流的流入端指向流出端。

根据楞次定律，感应电流所产生的去磁通总是与产生感

应电流的主磁通的方向相反。

这样一来，便可以根据穿过线圈的去磁通方向，用右手定则确定感应电流的方向，从而确定感应电势的方向。

绕向相同、端子标记相同，感应电势方向相同：如图 5 a 所示，线圈均为左绕向，上端均为线端，下端均为末端。如果二个线圈交链的主磁通 Φ 方向向上，去磁通 Φ' 方向向下，由绕向根据右手定则（图 4 b 的情况）推知高、低压线圈感应电流 i'_{Ax} 、 i'_{ax} 均自下流入，所以高低压线圈感应电势 E_{Ax} 、 E_{ax} 方向均向上。 E_{Ax} 和 E_{ax} 的夹角为 0° ，即相位移为 0° ，是同相位的，也是同极性的。 A 、 a （或 X 、 x ）是同电位对应端，也就是同极性端。一般在高压线端 A 和它的对应端（这里是 a ）标以“*”号。

绕向相反，端子标记相同，感应电势方向相反：如图 5 b 所示，高压线圈为左绕向，低压线圈为右绕向；上端均为线端，下端均为末端。根据右手定则，感应电流 i'_{Ax} 自下流入，而 i'_{ax} 自上流入，所以感应电势 E_{Ax} 向上，而 E_{ax} 向下。它们的夹角为 180° ，即相位移为 180° ，是反相位（反极性）的。

绕向相同，端子标记相反，感应电势方向相反：如图 5 c 所示，根据右手定则， i'_{Ax} 自下流入，由于端子标记相反， i'_{ax} 是自下流入，相当于 i'_{ax} 是自上流入，所以 E_{Ax} 向上，而 E_{ax} 向下。它们也是反相位（反极性）的。

绕向相反，端子标记相反，感应电势方向相同：如图 5 d 所示，根据右手定则， i'_{Ax} 自下流入，由于绕向相反 i'_{ax} 自上流入，而端子标记又相反，相当于 i'_{ax} 自下流入，所以 E_{Ax} 、 E_{ax} 均向上。它们是同相位（同极性）的。

绕向和端子标记任意变化时，按上面的分析，同一铁心

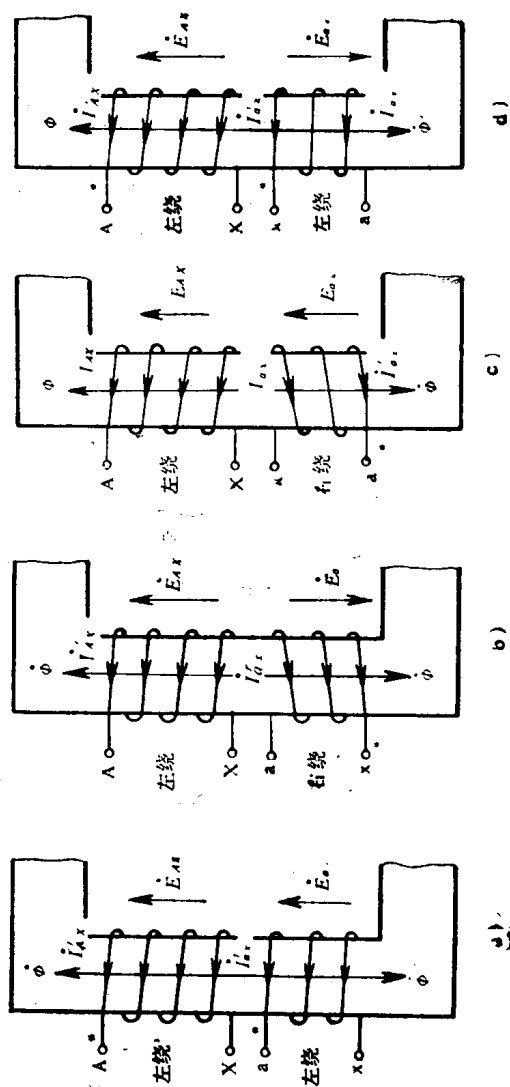


图5 由线圈绕向和端子标记确定感应电势的相位关系
a)、d) 同相位 (同极性) 时 b)、c) 反相位 (反极性) 时

柱上的二个线圈的感应电势可以是同相位（同极性）的，也可以是反相位（反极性）的，且只有这二种。前一种的相位移为 0° ，后一种相位移为 180° 。

如果把二个线圈的绕向、端子标记和感应电势方向相同的记作“+”号，相反的记作“-”号，那么在确定同一铁心柱上高、低压线圈感应电势的相位关系时，可应用乘法的符号法则，也就是：

绕 向	端 子 标 记	感 应 电 势 方 向
+(相同)	+(相同)	+(相同)
-(相反)	+(相同)	-(相反)
+(相同)	-(相反)	-(相反)
-(相反)	-(相反)	+(相同)

采用乘法的符号法则，确定感应电势的相位关系就很方便了。

由此也可以知道，二个线圈不在同一铁心柱上时，如果主磁通方向相反，那么感应电势的相位关系正好与上述相反。

5. 线圈电压的相位和极性

前言中已经说过，讨论变压器的连接组，主要是讨论不同侧线圈间电压的相位关系，也就是讨论高、低压侧间电压相量的相位关系，而不是讨论线圈感应电势的相位关系。

然而，从变压器的基本原理可以知道，高、低压侧间的电压相位关系和感应电势的相位关系是完全一致的。

对于图 6 所示的绕向相同、端子标记相同的双线圈变压器来说，如果把高压线圈作为一次线圈，低压线圈作为二次线圈。那末，在高压电路里，高压线圈是负载；在低压电路里，低压线圈是电源。

电流方向：如果在铁心中主磁通 ϕ 方向向上，根据右手定则产生主磁通的高压电流 i_{Ax} 必经线圈线端 A 流向末端 X ，也就是和图5a中的感应电流 i'_{Ax} 方向相反；而在低压线圈中总是产生反磁通，所以低压线圈电流 i_{ax} 就是感应电流 i'_{ax} (图5a)，是经线圈末端 x 流向线端 a 的。

电压方向：任一闭合电路二点间的电压方向是与路径有关的。高压线圈既然是负载，高压电压 $\dot{U}_{Ax}$ 表示外部电源加在高压线圈上的电压，所以高压电压 $\dot{U}_{Ax}$ 的方向不但应与高压电流 i_{Ax} 方向一致，而且应取高压线圈这个

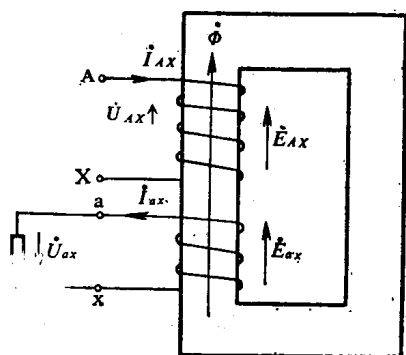


图6 变压器高、低压电路图

路径；低压线圈既然是电源，低压电压 $\dot{U}_{ax}$ 表示加在外部负载上的电压，所以低压电压 $\dot{U}_{ax}$ 的方向不但应与低压电流 i_{ax} 方向一致，而且应取外部负载这个路径。

电势方向：由上节(图5a)可知， $\dot{E}_{Ax}$ 、 $\dot{E}_{ax}$ 均由线圈末端指向线端。

这样，在忽略变压器阻抗的理想情况下，就可画出变压器的电压和电势相量图，如图7所示。

高、低压线圈感应电势 $\dot{E}_{Ax}$ 和 $\dot{E}_{ax}$ 方向相同，相量均向上；

高、低压线圈电压 $\dot{U}_{Ax}$ 和

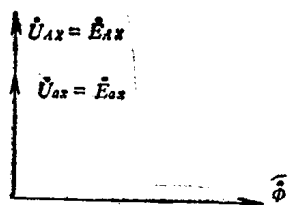


图7 变压器在理想情况下的电压、电势相量图

$\dot{U}_{ax}$ 方向分别与 $\dot{E}_{Ax}$ 和 $\dot{E}_{ax}$ 方向相同，相量也均向上。

由图 7 可以清楚地看出，在忽略线圈阻抗的理想情况下，高、低压线圈的电压与感应电势是大小相等，方向相同的。这在变压器空载的情况下，高、低压线圈的阻抗压降近似等于零，上述关系是适用的。

应该指出，上面所论述的变压器基本原理，对线圈绕向和端子标记所有的变化情况都是适合的，所以可以用线圈电压来代替感应电势讨论变压器连接组。同样也可以应用乘法的符号法则来确定同一铁心柱上的高低压线圈的电压相位关系，也就是：

绕向相同（相反），端子标记相同（相反），电压相量方向相同，

绕向相反（相同），端子标记相同（相反），电压相量方向相反。

同样可以说，高、低压线圈电压的相量方向相同时，是同相的或同极性的，相位移为 0° ；高、低压线圈电压相量方向相反时，是反相的或反极性的，相位移为 180° 。

二个线圈不在同一铁心柱上时，如果主磁通方向不同，上述电压相位关系正好相反。

在讨论变压器连接组时，为了方便起见，通常假定高压线圈线端具有高电位，而高、低压线圈的末端（或线端）具有相同的电位。

由于高压线圈线端假定有高电位，其线端永远是它的正极，而末端永远是它的负极，所以高压线圈线端 A 一般标以“*”号。低压线圈则看线端是正极还是末端是正极而标以“*”号。

由于线圈电压的相量方向是由线圈末端指向线端的，通

常用 $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ 、 $\dot{U}_{Am}$ 、 $\dot{U}_{Bm}$ 、 $\dot{U}_{Cm}$ 、 $\dot{U}_a$ 、 $\dot{U}_b$ 、 $\dot{U}_c$ 来表示电压相量。

高低压线圈的极性关系，有时也用减极性和加极性来表示。极性相同的称为减极性，极性相反的称为加极性。

这是因为，如果把高、低压线圈的末端（假定电位相同）连在一起，它们线端之间的电压，极性相同的等于二个线圈的电压之差， $U_{Ao} = U_A - U_o$ ，如图 8 a 所示；极性相反的等于二个线圈的电压之和， $U_{Ao} = U_A + U_o$ ，如图 8 b 所示。

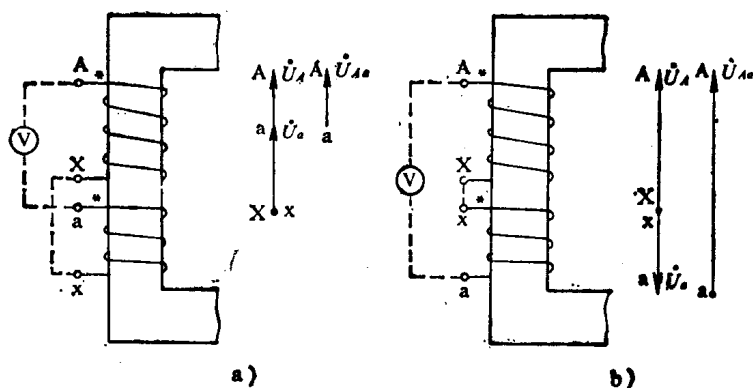


图 8 线圈的极性

a) 减极性 b) 加极性

同一铁心柱上的高、低压线圈，在线圈绕向和端子标记的所有可能的组合下，借用右手定则或乘法的符号法则确定的高、低压线圈电压的相位关系，如图 9 所示，共有 16 种情况。

在前 8 种情况下（绕向相同且端子标记也相同，或绕向相反且端子标记也相反），线圈电压相位相同；在后 8 种情况下（绕向相同但端子标记相反，或绕向相反但端子标记相

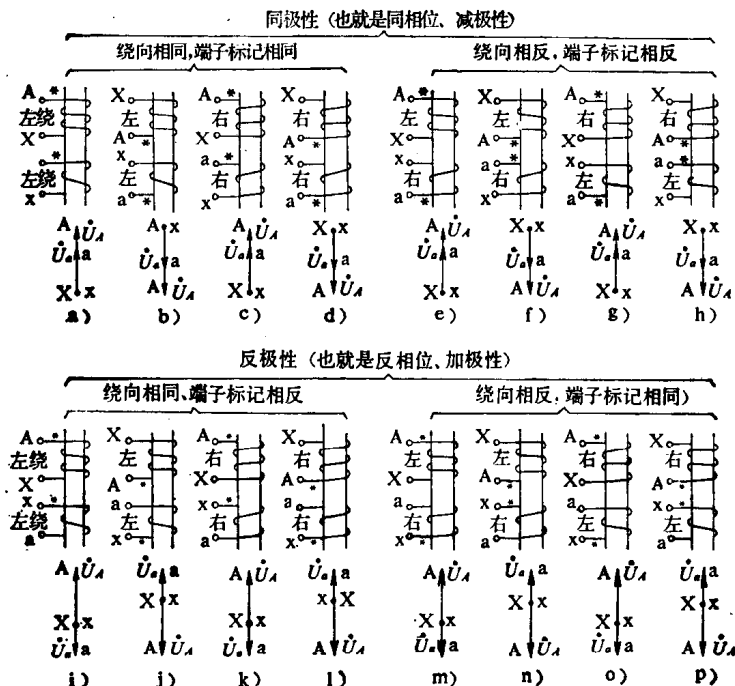


图9 高、低压线圈电压的相位和极性

同), 线圈电压相位相反。这也就是, 套在同一铁心柱上的高、低压线圈电压, 不是同极性的就是反极性的, 二者必居其一。

6. 三相系统的相序

电力系统往往是多相电路, 常用的是三相电路。这是因为电源(如发电机)通常是三相的缘故。电源相电压之间的相位移是 120° , 变压器三相电压也相差 120° 。三相电压相量的一端交于一点时如图10 a、c所示; 三相电压相量首末端相接时如图10 b、d所示。