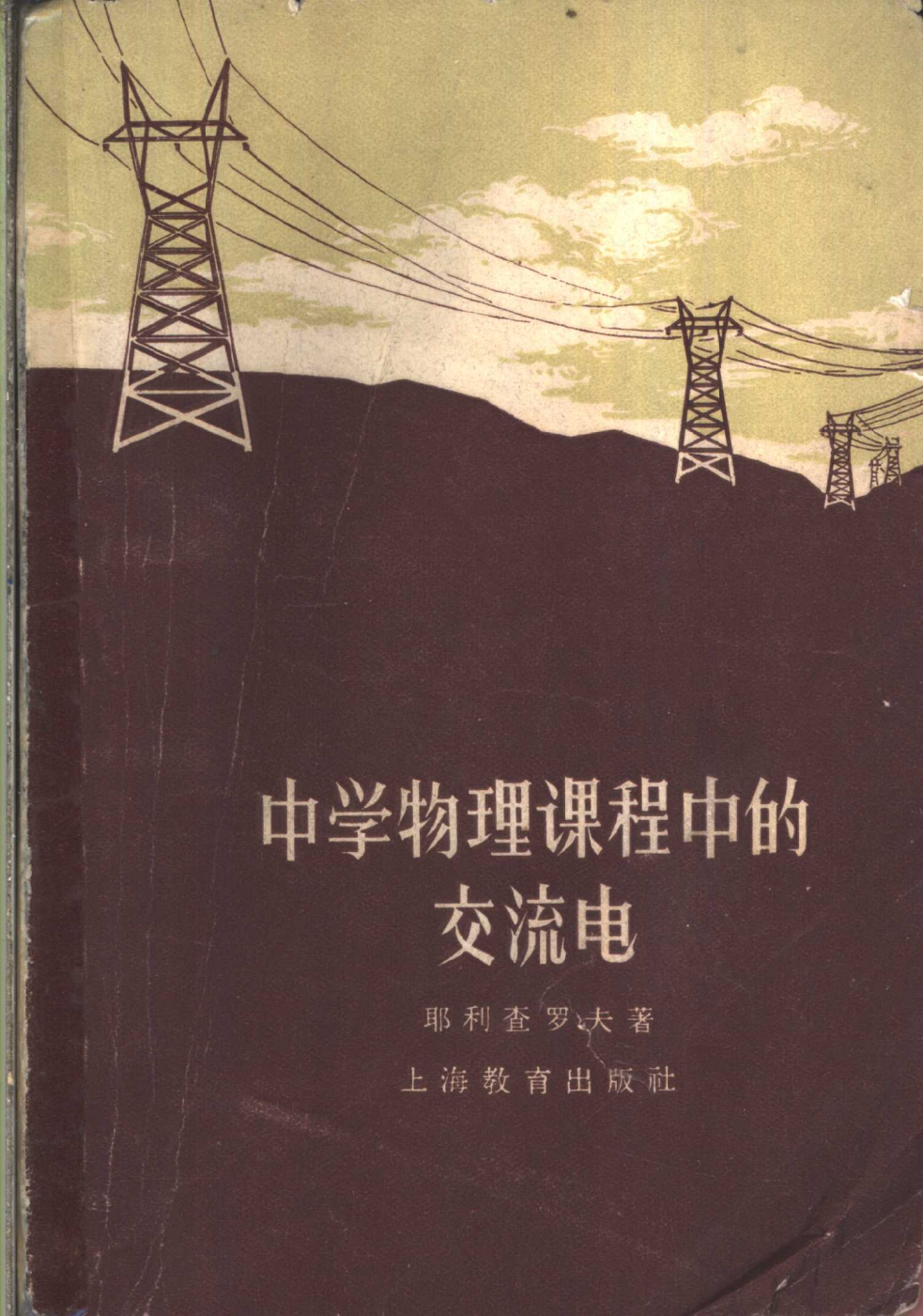


The background of the book cover features a stylized illustration. In the foreground, there are dark, silhouetted hills. Above the hills, several high-voltage power line towers are visible, with power lines stretching across the sky. The sky is a mix of yellow and green, suggesting a sunset or sunrise, with some white clouds. The overall style is that of a mid-20th-century book cover.

中学物理课程中的 交流电

耶利查罗夫 著

上海教育出版社

目 录

引 言	1
-----	---

第一章 单相交流电

§ 1. 交变电动势的产生	4
教法建議	10
§ 2. 电动势的周期性变化	13
电动势的图綫	13
教法建議	16
§ 3. 交流电	17
教法建議	23
§ 4. 研究交流电的方法	25
机械示波器	26
电子射綫示波器	28
教法建議	30
§ 5. 交流发电机	38
具有旋轉电樞的发电机	39
具有旋轉感应体的发电机	41
教法建議	43
§ 6. 交流电的图示法	44
§ 7. 相位差 矢量图	47
教法建議	50
§ 8. 交变电流和交变电压的有效值	50
教法建議	53
§ 9. 有效电阻	55

教法建議	57
§ 10. 容抗	58
教法建議	70
§ 11. 感抗	72
教法建議	92

第二章 三相交流电

§ 12. 三相交流电的产生	99
教法建議	112
§ 13. 发电机繞組的星形接法 四綫三相制	123
教法建議	125
§ 14. 相电压和綫电压	128
教法建議	129
§ 15. 用电器的星形联接	130
教法建議	131
§ 16. 发电机繞組成星形联接时的三相三綫制	133
教法建議	136
§ 17. 发电机繞組和用电器的三角形联接	140
教法建議	144
§ 18. 三相交流发电机	147
教法建議	150
§ 19. 异步电动机的作用原理 旋轉磁場	150
教法建議	158
§ 20. 三相异步电动机	162
教法建議	167
§ 21. 米哈伊尔·奥斯波維奇·多利沃·多勃罗沃利斯基	169
教法建議	170

第三章 交流电的整流

§ 22. 把交流电变成直流电	171
教法建議	172
§ 23. 二极管电子管	173
教法建議	179
§ 24. 二极管整流器 离子整流器	181
教法建議	186
§ 25. 固体(半导体)整流器	188
氧化銅整流器	189
硒整流器	190
鋳整流器	191
教法建議	192

第四章 直流电机

§ 26. 直流发电机	193
教法建議	198
§ 27. 直流发电机的种类	199
并激发电机	201
串激发电机	203
复激发电机	204
教法建議	205
§ 28. 直流电动机	206
教法建議	209

第五章 电流的变压

§ 29. 电能的輸送	210
教法建議	217

§ 30. 变压器	222
1. 变压器的构造	222
2. 变压器繞組的圈数和电压的关系	223
3. 变压器綫圈中电流跟圈数的关系	228
4. 变压器中能量的损失和变压器的效率	231
5. 变压器的应用	232
6. 变压器的发明	233
7. 三相变压器	234
教法建議	236

第六章 苏联的电气化

§ 31. 电气化的物理基础	245
1. 电能的优点	245
2. 苏联的电气化	246
3. 发电厂的分类 輸电綫	247
4. 电力系统	249
教法建議	250
§ 32. 电能在全国經濟中的应用	251

引 言

在教育部规定的大綱中應該討論的那些問題都已包括在本书里。物理教学法的任务就在于根据教学大綱来确定教材的广度与深度。这个问题現在还不能认为已經完全解决，因此进一步总结教师在这方面的經驗是合适的；何况到现在为止，关于“交流电”这个課題的教学法研究还不多。在茲那敏斯基和索柯洛夫^①的物理教学法里，对于这个課題談得特別簡略。而在烏沙柯夫^②写的关于教学法的小册子里，只討論了这个課題的一部分內容——三相交流电。在烏沙柯夫^③的另一本书里差不多着重直流电的問題。古列基^④的书里对于交流电的理論进行了比較全面的叙述。然而这一本好书的内容已經不适合現行的中学物理教学大綱。

对于如何安排“交流电”課題的讲授系統这样一个十分重要的問題不能认为已經解决。可以有各种不同的方法来解决这个问题。但是教材安排的系統不仅决定于学生知識水平和已有的物理知識，严格地說，还跟学生在学到这个課題之前的

① И. А. 茲那敏斯基：“中学物理教学法”，苏联教育出版社（簡称），1954年版；Н. Н. 索柯洛夫：“中学物理教学法”，苏联教育出版社（簡称），1951年版。

② М. А. 烏沙柯夫：“中学課程中的三相交流电”，苏联教育出版社（簡称），1955年，69頁。

③ М. А. 烏沙柯夫：“电流定律的研究”，苏联教育出版社（簡称），1953年，44頁（中譯文見1954年物理通报第7，8，10三期）。

④ Е. Н. 古列基：“交变电流”，苏联教育出版社（簡称），1938年176頁。

这一阶段中物理課程的系統和内容有关。

交流电的理論不只有教育意义，还有实用的意义。物理学教学是实现綜合技术教育的主要途徑之一。学校應該把各生产部門主要的、基本的知識介紹給学生，闡明其科学原理，这些原理是现代許多生产过程的基础。在所有生产部門中最普遍的特征之一是它們都广泛地应用电流，主要是用交流电。生产的另一特征是普遍地机械化。同内燃机一样，电动机是现代各生产部門中最主要的发动机。所以在討論交流电的性质、发电、变压及变压設備、电动机的构造和作用原理等課題的教学法时，應該考虑到綜合技术教育的問題。

最后在研究这个課題的教学法时，應該注意到教材的时间分配。

上面所列举的关于“交流电”这一課題的教学法問題，在这本书里都将談到。自然，所談的解决这些問題的方法只是許多可能的方法中的一种。

我們把最重要的問題在每节后面的教学法建議里提出来，而不放在正文中讲，这样可以叙述得清晰一些。

下面提出的示范性教学計劃里的教学時間（16課时）是根据教学大綱規定的时数。

本书所討論的某些問題比在課堂上讲授的要談得深入、詳尽些。在下面的教学計劃中列入的有关这些問題的教材不是全讲，而只是一部分。且在这几节后的教学法建議里指出那些是必須刪減的。

那些在讲解时会遇到很大困难的教材，象交流电的概念、三相交流电、电流的变压等問題，本书討論得特別詳細。其余的教材（它們的教育价值并不小）比較緊縮，因为讲授时困难較小。

这一课题的示范性教学计划

(16 课时)

I. 单相交流电

交流电的概念。交流发电机 (§ 1—3, 5) (3 课时)

交变电流和电压的有效值 (§ 8) (1 课时)

容抗和感抗的概念 (§ 9—11) (2 课时)

II. 三相交流电

三相交流电。星形连接和三角形连接 (§ 12—17) (3 课时)

异步电动机 (§ 19—21) (1 课时)

III. 交流电的整流

二极管电子管。交流电的整流 (§ 22—25) (2 课时)

IV. 交流发电机和交流电动机

交流发电机。交流电动机 (§ 26, 28) (1 课时)

V. 交流电的变压

输电线上的能量损失及解决的方法。变压器 (§ 29—30)

..... (2 课时)

VI. 苏联的电气化

苏联的电气化。电动机的应用 (§ 31—32) (1 课时)

第一章 单相交流电

§ 1. 交变电动势的产生

我們已經研究过直流电流，这种电流的量值和方向都不随時間而变化。在电磁感应现象里，我們第一次遇到了交流电。可以用綫圈来做一下法拉第的电磁感应实验：把永久磁铁或通有电流的原綫圈在副綫圈中移进或移出，那么在第二个綫圈中就产生了感生电动势。用另外的方法，如：接通或切断原綫圈中的电流；增强或减弱原綫圈中的电流；或者在一个綫圈里用一根鋼棒移进或移出，都会产生同样的結果——在副綫圈中有感生电动势产生。在上列情况中，通过副綫圈的磁通量量值有了改变（增加或减少），方向也有了改变。

在上面的例子里，由于磁通量在改变，在副綫圈中产生的感生电动势同样也在改变着。它的量值和方向都在变化。这一点可以从接在副綫圈回路中的电流計指針偏轉的角度或大或小、时左时右的变动来証实。大家知道，正是因为发电站中产生的电动势是交变的，我們所获得的电流也是交变的。現在我們来討論在电路中产生交变电动势的条件。

磁极 N 和 S 之間有磁場（图 1），假定这是匀强磁場。磁极之間有一金属单匝綫圈匀速轉动着。綫圈的两端各接在互相絕緣的銅环上，而在銅环上又紧压着电刷。金属綫圈是不閉合的。图 2 表示这个矩形的单匝綫圈在几个不同位置的断面图（圓圈表示图 1 中纵向导綫 ad 和 bc 的截面，实綫表示

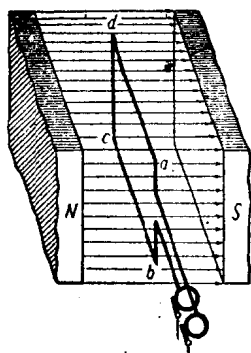


图 1. 在匀强磁场中匀速转动的单匝线圈

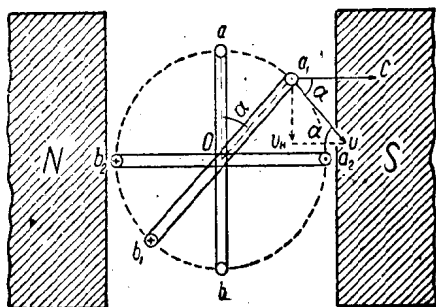


图 2. 在匀强磁场中匀速转动的单匝线圈的断面图

坚直方向的导线 dc)。通过线圈的面积 $abcd$ 的磁通量, 有一定数值。当矩形线圈转动时, 通过线圈的磁通量不断地改变, 在线圈里就产生了感生电动势。

我们可以讨论一下线圈中产生的感生电动势的方向以及它的量值。导线中感生电动势的方向, 就是把线圈闭合以后, 由于这一感生电动势所产生的感生电流的方向。假定单匝线圈按顺时针方向旋转, 我们注意图 1 中导线 ad 的运动。这导线的截面在图 2 中用字母 a 来表示。当导线 a 沿着图 2 中用虚线表示的右面半个圆周运动时, 它自上向下割切磁力线。磁力线的方向是自左向右的 (自 N 指向 S)。根据右手定则, 知道导线 a 中感生电动势的方向是指向我们的。

当导线 a 沿左面半个圆周运动时, 它自下向上割切磁力线。这时电动势的方向显然跟前面相反, 它指向书内。当导线 a 通过圆周上的 a 和 b 两点时, 电动势就按相反的方向改变。同理可以说明导线 b 中的情况, 所不同的只是在导线 b 中感生电动势的方向永远跟导线 a 中的方向相反。当导线通

过联结 ab 两点的平面时,导线中感生电动势的方向就按相反的方向改变,这个平面叫做中性面。也就是说线圈每转一周,其中电动势的方向要改变两次。

我们可以从两方面来讨论线圈中产生的电动势的量值。先作定性的讨论。

上面已经指出在导线 ad 和 bc 中(参看图1)电动势的方向是相反的。导线 ad 跟 bc 由坚直的导线 dc 首尾相联,因此其中产生的电动势是相加的。所以第一:当线圈在磁场中旋转时,可以讨论其中产生的总电动势。第二:根据电磁感应定律,可以说感生电动势的量值跟通过导线回路①中截面的磁通量的改变速率成正比。当线圈经过中性面时,通过导线回路横截面积的磁通量的数值最大,但是因为这时导线 ad 和 bc 运动的方向沿着磁感应线,所以磁通量改变的速率为零。因此这时候线圈中感生的电动势为零。当线圈继续沿顺时针方向旋转时,通过导线回路的磁通量将减少,而磁通量改变的速率增加了。于是回路线圈中的电动势就由零开始增长,电动势的方向可以根据上述方法来确定。

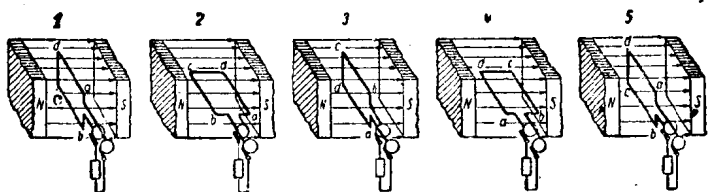


图3. 单匝线圈在磁场中转动时通过线圈截面的磁通量的变化情况

当线圈转过 90° , 转到位置2时(参看图3), 通过线圈回路的磁通量为零, 但是因为这时导线 ad 和 bc 垂直割切磁力

① 导线回路在这里和本节中都是指单匝线圈。

綫，所以磁通量改变的速率最大；因此这时候綫圈中电动势达到某一极大值，方向仍旧和前面一样。

綫圈繼續旋轉时，通过导綫回路的磁通量又增加，但磁通量的改变速率却减小了。

电动势的方向跟前面一样保持不变，但其量值将要减小。

当綫圈旋轉 180° 时（从它在中性面的位置 1 算起），綫圈又重新經過中性面（图 3, 3）。

这时通过单匝綫圈的磁通量又达极大值，但磁通量改变的速率为零，所以綫圈中的电动势又降低到零。

綫圈繼續旋轉，通过导綫回路的磁通量又将减小，但它的改变速率却又增加了。綫圈中的电动势相应地又从零开始增加，但是这时候电动势的方向恰巧跟前面相反；只要跟綫圈在中性面时的位置 1 比較就可以看出导綫 ad 和 bc 已經相互交换位置。在綫圈中电动势一直保持这个方向，直到它再旋轉 180° 为止。当綫圈轉到位置 4 时（轉角等于 270° ，参看图 3），通过导綫回路中的磁通量为零，磁通量改变速率最大因而电动势的值又达到极大值，但它的方向跟綫圈在位置 2 时相反。此后当綫圈从 270° 轉到 360° ，通过导綫回路的磁通量增加了，但磁通量改变的速率及电动势又降低到零。以后电动势的方向又发生改变，过程就这样循环着进行。

討論过电动势的这种循环变化后，再从定量的方面来看这一現象。

大家都知道，长度为 l 的直导綫在磁感应强度为 B 的匀强磁場中以速度 v 运动时，如果它以 α 角来割切磁力綫（ v 和 B 的夹角为 α ），那么导綫中产生的感生电动势是：

$$\varepsilon = kBlv \sin \alpha,$$

k 是比例常数，由公式中各物理量的单位来确定。当 $\angle \alpha = 90^\circ$

时，导线运动的方向跟磁感应矢量 B 的方向成直角，导线中的电动势将达极大值。

$$\varepsilon_M = kBlv。$$

导线运动的方向跟磁感应矢量的方向成某一任意角时，感应电动势的值可以用它的最大值来表示。

$$\varepsilon = \varepsilon_M \sin \alpha。$$

(顺便指出，公式 $\varepsilon = kBlv \sin \alpha$ 及公式 $\varepsilon = \varepsilon_M \sin \alpha$ 给出了通过导线回路的磁通量改变率，这跟电磁感应定律公式的另一种表示 $\varepsilon = k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ 是一样的。式中 $\Delta \Phi$ 是磁通量的变化，而 Δt 是磁通量变化所经过的时间间隔)。

再回过头来讨论在磁场中旋转的导线回路 (参看图 1 和图 2)。

线圈在匀强磁场中匀速旋转时，导线 ad (图 1，及图 2 中的 a) 中产生的电动势

$$\varepsilon_1 = kBlv \sin \alpha。$$

式中的 α 角是导线运动方向跟磁感应强度矢量 B 之间的夹角。在这里它也等于线圈从中性面算起所转过的角度。例如线圈在位置 a_1b_1 (图 2) 时， a_1v 是这一瞬间导线运动的方向 (跟导线运动的圆弧在 a_1 点相切)， a_1c 是磁感应强度的方向 (从 N 指向 S)。角 ca_1v 等于 $\angle aoa_1$ ，就是等于线圈转过的角度。

因此对于在磁场中旋转的线圈来说，角度 α 可以看作是线圈从中性面算起的旋转的角度。

在第二根纵的导线 bc 中 (图 1，及图 2 中的 b) 产生的感生电动势 $\varepsilon_2 = kBlv \sin \alpha$ 。显然 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ (竖直导线 dc 跟 ab 不割切磁感应线，因此其中不产生感生电动势)。

前面已经指出，在导线 ad 跟 bc 中感生电动势的方向是

相反的。用豎直的導線 dc 把 ad 跟 bc 首尾相接以後，導線 ad 和 bc 中的電動勢是相加的。因此單匝綫圈（由兩根導線所組成的）中的電動勢

$$\varepsilon = 2\varepsilon_1 = 2kBlv \sin \alpha,$$

當綫圈自中性面轉過 90° 後，綫圈中的電動勢具有極大值，

$$\varepsilon_M = 2kBlv_0.$$

當綫圈在任意位置時，它里面產生的電動勢可以用最大的電動勢來表示如下：

$$\varepsilon = \varepsilon_M \sin \alpha_0.$$

從我們所得出的公式可以知道，當綫圈在磁場中旋轉時，隨著轉角的增加，綫圈中電動勢量值變化的情況。

當綫圈的轉角自 0° 轉到 360° ， $\sin \alpha$ 的值自 0 開始在 ± 1 之間變化。這時綫圈中的電動勢自 0 開始在 $\pm \varepsilon_M$ 之間變化，就是當：

$\angle \alpha = 0^\circ$	$\sin \alpha = 0$	$\varepsilon = 0$
$\angle \alpha = 90^\circ$	$\sin \alpha = 1$	$\varepsilon = +\varepsilon_M$
$\angle \alpha = 180^\circ$	$\sin \alpha = 0$	$\varepsilon = 0$
$\angle \alpha = 270^\circ$	$\sin \alpha = -1$	$\varepsilon = -\varepsilon_M$
$\angle \alpha = 360^\circ$	$\sin \alpha = 0$	$\varepsilon = 0$

從這裡可以看出，綫圈中的電動勢按某一方向從零開始增加到最大值，然後保持這一方向又減為零。此後電動勢的方向跟前面相反，又從零增加到最大值，然後又降為零。當綫圈經過中性面時電動勢為零，同時改變方向。

因此，在勻強磁場中勻速轉動的綫圈里產生的電動勢跟綫圈從中性面的起始位置算起的轉角的正弦成正比。

換句話說，在勻強磁場中勻速轉動的綫圈里的電動勢隨着時間的變化而按正弦定律變化。

教法建議

交流電的概念，可以從感生電流的第一個實驗開始時引入。所以在第一段里可以提一下法拉第綫圈的實驗。從研究單匝綫圈在勻強磁場中勻速轉動以產生交變電動勢，更具體地向學生講解交流電，是很自然而合理的。必須十分明確地告訴學生，綫圈是在勻強磁場中勻速轉動的。

我們知道，在交流發電機中，電樞繞組是在非勻強的磁場中勻速旋轉着的。磁極必須要做成這樣的一種形狀，使得沿着電樞表面的圓周上磁感應強度按正弦規律變化，而磁力綫方向應和電樞表面的法綫方向一致。這樣可以使電樞繞組在勻速旋轉時所產生的電動勢按正弦規律而變化。

但是，只有學生具有足夠豐富的知識時，才可能這樣講，而中學生是沒有這些知識的。所以我們只能認為磁場是勻強的，綫圈在其中勻速地轉動着。這就是我們在§1里採用的方法。

我們知道，電動勢是標量，而不是矢量。認為電動勢有方向，嚴格地來說是不合理的。通常把電動勢加上正、負號。在許多情況下，採用這種方法還是比較方便的。

在§1里敘述產生交變電動勢的過程時，我們採用了這樣的程序：先討論綫圈旋轉一周電動勢方向的變化，然後定性地分析電動勢量值的變化（不用數學的方法），以後再解釋交變電動勢跟綫圈轉角的关系式。這樣組織教材，不僅保證了循序漸進以及對於要討論的問題有清晰的敘述，同時還促使學生進一步理解這一過程的物理本質。

所有產生交變電動勢的討論都是根據圖1、圖2及圖3導出的，其中主要是圖2。這個圖應該在上課時畫在黑板上。為

了使学生容易了解，最好应用一种在学校里已普遍使用的交流发电机的示意模型(带有集流环的导线做成的线圈框，可以在两块象征永久磁极的固定的白铁板间旋转的仪器)。这个仪器可以帮助学生在分析图 2 时，了解电动势的方向是如何改变的；在什么时候改变；在线圈旋转的时候，通过线圈回路的磁通量是如何改变的等等问题。在用这种模型时，为节约时间可以不在黑板画好图 3 和图 1。当然所谓“节约”时间应该是从不会损害教学效果来看的。交变电动势的概念是交流电理论的出发点，应该要使学生能透彻地理解。

当线圈从 0° 转到 90° 时，通过线圈的磁通量减少了，但磁通量改变的速率是增加了。要使学生对于这点有正确的概念，有时候会遇到相当大的困难。这些是必须在事先考虑到的。

利用图 2，跟上面提到的仪器(在两个磁“极”间的导线框)，如果有必要还可用板图(图 3)，可以十分清楚地让学生看到，通过导线回路的磁通量是怎样在连续变化的。为此，也可以利用下面的方法①。

在某一时刻，线圈转到位置 1 (图 3)，这时线圈的平面跟磁场的方向相垂直，通过线圈的磁通量 Φ_M 最大。当线圈从这一位置转过 α 角，磁通量减少了，变为 $\Phi_M \cos \alpha$ ，到了位置 2 跟位置 4，磁通量为零。

为了确定感生电动势的量值，必须找出通过线圈的磁通量改变的速率。当线圈匀速转动时，在相等的时间间隔里转过的角度是相等的。设线圈从位置 1 转过一个 2° 的角。 α 角从 0° 增加到 2° ， $\cos \alpha$ 从 1.000 减到 0.999，就是减少 0.001，磁通量的改变是 $0.001 \Phi_M$ 。现在再看线圈从 45° 转过 2° ，即

① П. А. 雷姆克维奇教授的建議。

轉到 47° 时, 磁通量是怎样改变的 (在相等的时间間隔內)。 $\cos \alpha$ 从 0.707 减到 0.682, 就是减少 0.025, 而通过綫圈的磁通量变化是 $0.025 \Phi_M$ 。当它从 88° 同样轉过 2° 轉到 90° 时, $\cos \alpha$ 从 0.035 减到 0, 通过綫圈的磁通量改变了 $0.035 \Phi_M$ 。因此我們得到这样的結論: 由通过綫圈的磁通量改变快慢来量度的感生电动势, 在不同的时刻是不等的。它在位置 1 时最小, 随着綫圈轉向位置 2 而逐漸增加。到位置 2 时达极大值, 然后随着綫圈轉到位置 3 感生电动势又降为零, 而轉到位置 4 时它的絕對值又是最大。当綫圈通过位置 1 和 3 时, 感生电动势变为零, 在这些时刻它的方向要向相反的方向改变。

为了把这个过程讲得更清楚, 最好在讲述的时候把遇到的一些物理量如綫圈的轉角 ($\angle \alpha$)、通过綫圈面积的磁通量 (Φ)、磁通量的改变速率 $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ 跟感生电动势 (ε) 的量值和方向都写在黑板上。

$\angle \alpha$	Φ	$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$	ε
0°	最大	0	0
$0^\circ - 90^\circ$	减少	增加	增加
90°	0	最大	$+\varepsilon_M$
$90^\circ - 180^\circ$	增加	减少	减少
180°	最大	0	0
$180^\circ - 270^\circ$	减少	增加	增加
270°	0	最大	$-\varepsilon_M$
$270^\circ - 360^\circ$	增加	减少	减少
360°	最大	0	0

通过导綫回路的磁通量的值及其改变速率, 在以后討論三相发电机的作用原理时, 我們还要用到它們。