

62

10678

高等学校交流讲义

微 电 机

周 鶚 徐德淦 卜开貴編著

吳大榕审訂

只限学校内部使用



10678
52.H83

中国工业出版社

序 言

控制用微型电机目前得到了广泛的应用，对它们的理論和实际问题的研究也日益受到重視。这和整个科学技术的发展，各种經濟建設部門中生产过程的机械化、电气化和自动化工作的不断深入，有着密切的联系。因此，了解和学习有关微电机方面知識的要求，也就日益普遍而迫切。

絕大部分微电机的工作原理，仍然以一般电机学中异步电机、同步电机和直流电机的工作原理为基础。因此，为了掌握微型电机的性能和結構，以达到能够灵活运用为目的，首先对一般的电机学理論和实际知識应有足够的了解。

另一方面，微型电机的种类繁多，性能要求严格，結構設計和生产制造上也有很大的特殊性，再加和新技术的发展有着密切的联系，所以它已逐渐发展成为一种新的专门学科。

当前在国内，有些高等院校的有关专业，已經先后在电机課程中增加了这一方面基本知識的讲授，有些还設置了专门的課程。但是，有关的参考教材还是比较缺乏的。

本书主要是参照大家熟知的几本国外书籍的材料（見211頁所列参考书），結合我們在学习和教学过程中的一些初步体会編写而成的。它包括了四种主要的控制电机，即执行电机、測速电机、回轉變压器和自整角机。

关于編写工作和內容方面有以下几点說明：

1. 为了解决教材的有无問題，我們抱着认真学习的态度来进行本书的編写工作；

2. 比較專門的問題在教材中沒有包括進去，有關應用和實驗方面的說明也將在今後逐步提高的過程中加以補充；

3. 把基本的作用原理和進一步的分析適當地進行劃分，這樣就有可能根據各種不同專業的要求，靈活地加以選用；將基本內容講完估計約需二十餘學時，如全部講授則需四十學時左右；

4. 採用的符號盡量和大家熟知的書中的符號相一致；在不會引起誤會的情況下，也作了一些簡化；

5. 其他種類的微型電機暫未列入。

在黨的領導下，在教研組很多同志的熱情幫助下，我們才有可能對本書的編寫作了大膽的嘗試。

本書的編寫工作是由周鶚主持和組織的，有吳大榕、徐德淦、卜開貴等人參加。前三章的初稿由周鶚編寫，經卜開貴整理補充；後一章的初稿由徐德淦編寫，經周鶚修改；全書最後由吳大榕進行審閱，加以指正，並改寫了部分章節。在定稿過程中，各部分又都經過相互修正和集體研討。

毋庸諱言，編寫者對這方面的理論和實際知識都是比較缺乏的，再加時間比較短促，所以書中不妥或者錯誤的地方一定不少，希望有關同志能夠多加指正，以便今後改進。來函請寄南京工學院電機教研組本書編者收。

編 者

目 录

序言

第一章 执行电机	5
第一节 交流执行电机的基本结构和作用原理	5
第二节 交流执行电机的一般理论分析	10
第三节 交流执行电机的运行特性	26
第四节 直流执行电机的作用原理和运行特性	48
第二章 测速发电机	62
第一节 概述	62
第二节 直流测速发电机	64
第三节 空心转子式交流测速发电机的工作原理	68
第四节 交流测速发电机的对称分量分析	71
第五节 交流测速发电机的交轴磁场理论	74
第六节 负载性质和负载大小对交流测速发电机引出特性的 影响	82
第七节 交流测速发电机的误差及减少误差的方法	92
第三章 回转变压器	96
第一节 回转变压器的结构、用途和基本作用原理	96
第二节 回转变压器的数学分析	113
第三节 回转变压器的误差及其结构特点对误差的影响	133
第四章 自整角机	149
第一节 概论	149
第二节 自整角机指示式运行的理论分析	163
第三节 指示式运行时自整角机的几个有关问题	183
第四节 指示式同步装置的精确度	190
第五节 差动式自整角机	197

第六节 自整角机的变压器式运行	201
参考书	211
附录一 АДП型交流执行电动机的技术数据	212
附录二 СЛ型直流执行电动机的技术数据	214
附录三 回轉變压器的技术数据	218
附录四 自整角机的技术数据	插頁

第一章 执行电机

第一节 交流执行电机的基本结构和作用原理

一、基本结构

在自动控制系统中，执行电机的任务是把所接收到的电气讯号转变为电机的机轴位移。电气讯号以控制电压的形式，作用在控制绕组上。随着所用电源种类的不同，执行电机又可分为交流执行电机和直流执行电机。在使用交流执行电机时，为了获得良好的性能，所用电源频率不一定是工频，有时也用较高的频率。

现代的交流执行电机都系二相异步电动机。在电机定子上绕有二个绕组，即控制绕组 y 和激磁绕组 B ，在空间相距 90 电度。

电机转子大致有三种形式，即一般的鼠笼式转子，非磁性材料制成的杯形转子（空心转子），和磁性材料制成的杯形转子。

最通用的转子结构形式为非磁性导电材料制成的空心转子。在空心转子里面，尚有内定子，作为主磁路的一部分，用以减小主磁路的磁阻。

图 1-1 表示空心转子执行电机的结构剖面图，图中 1 为外定子，其结构和普通异步电动机的定子结构相同，由电工钢片迭成铁芯，在定子槽中嵌有在空间相距 90 电度的激磁绕组和控制绕组。2 为内定子，也由电工钢片迭成，为圆柱形，固定在电机一边的端盖上。内定子上并无绕组，仅作为磁路闭合之用。3 为空心转子，一般用铝合金制成杯形，其

底盘固定在轉軸上，空心轉子的壁厚根据电机的容量而不同，一般在0.2~0.9毫米之間。4为机壳，5为端盖，6为繞組的端部，7为轉子的軸。

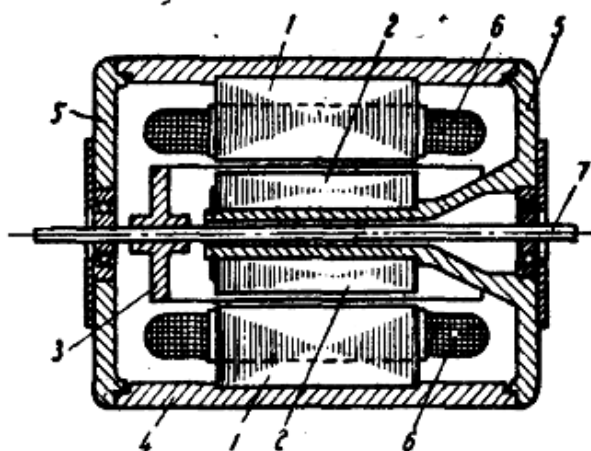


图1-1 空心轉子交流执行电机结构示意图

空心轉子电机由于空气隙很大，故激磁电流很大，約占額定电流的80~90%，因此其效率差，功率因数低，和同容量的异步电动机比較时，其体积和重量均較大。但是空心轉子电机的优点很多，例如：轉子轉动慣量甚小，有高起动轉矩，运行时反应灵敏，改变轉向迅速，平滑运行无噪音，不需要滑动接触，以及調速范围大，摩擦轉矩小等。这些优点使它在自动控制系统中得到广泛的应用。

应用高频激磁电源和控制电压，可以相对地减少空心轉子执行电机的体积和重量。

現今生产的空心轉子执行电机，其容量范围从小于一瓦到数百瓦，电源频率为工频（50周）或高频（有330，400，500，800，和1000周等），同步轉速在1500到30000每分轉之間。

二、控制方法

为使轉子能够轉动，必須使电动机的空气隙中产生一旋轉磁場。为此，加至激磁繞組上的电压与加至控制繞組上的电压之間必須有一相角差。此种相角差的获得可有二种办法：一是在电源接至控制繞組时先經過一移相器，一是在二繞組之一中接入分相元件。执行电机的分相元件常采用电容器，并且一般接在激磁繞組的回路中。

激磁回路常接至电压值不变的激磁电源。此时，控制电压的大小或者与激磁电压間相角关系的改变，都能够改变电机空气隙中的磁場，也就能够影响电机的工作情况。根据这一基本原理，即可获得执行电机的控制方法。

执行电机的控制方法有三种：（1）改变控制电压的大小，称为振幅控制。（2）改变控制电压对激磁电压的相角关系，称为相位控制。（3）同时改变控制电压的大小及相角，称为振幅-相位控制。

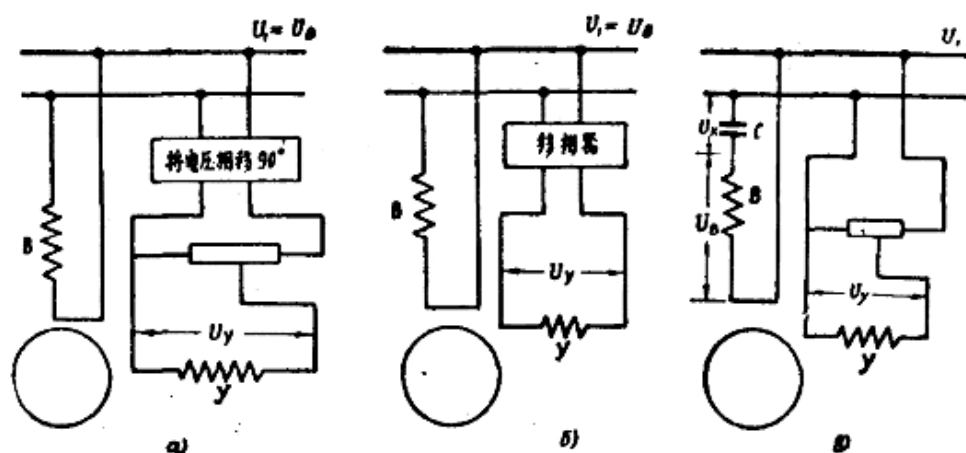


图1-2 控制繞路图

a—振幅控制时；b—相位控制时；c—振幅-相位控制时

如图1-2所示，(a)为振幅控制， U_B 为激磁电压，即等

于电源电压 U_1 。 U_v 为控制电压，它与 U_B 之间的相角差保持为 90° 不变，它的大小可由调节电位计上的移动触头来改变。(6) 为相位控制，这时 U_v 的大小不能改变，但它的相位可由调节移相器来改变。在图 1-2(6) 中， $U_1 = U_k + U_B$ ，当改变控制电压 U_v 时，激磁绕组及其串联电容器上的电压分布也随着改变，因此 U_v 与 U_B 间的相角差也将改变，故此种控制称为振幅-相位控制，或简称电容器控制。

三、运行特点

和普通的异步电动机比较，对执行电机有如下二点特殊的要求：

(1) 普通的异步电动机虽不能单相起动，但是在已经运转以后，即使是在单相电压的作用下仍可继续运转。执行电机中的类似现象就是：在执行电机转动以后，再使控制电压减为零，此时在仅只有激磁电压作用的情况下，转子仍然能够继续旋转。此种现象称为自运转。实用上，对执行电机却不允许有此现象。执行电机的转动与否，应该决定于控制电压(讯号)的有无，当讯号停止后，执行电机必须立即停止转动，若仍然继续转动便意味着失去了控制。

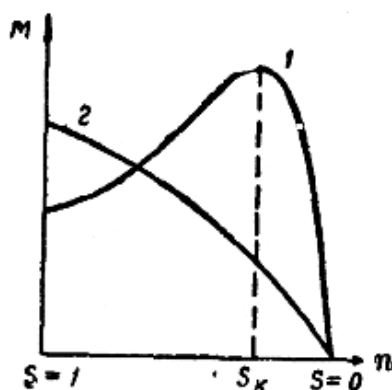


图1-3 异步电动机的机械特性

(2) 普通的电动机的机械特性如图 1-3 中的曲线 1，能够稳定运行的区域仅为从 $s=0$ 到 $s=s_k$ 的一段。由于 s_k 仅为 $10\sim 20\%$ ，转速的可调范围甚小。执行电机却需要在较大的速率变化范围内稳定运行，故执行电机的机械特性应如图 1-3 中的曲线 2 才能满

足要求。同时比較这两条曲綫，可見曲綫2比曲綫1有較大的起動轉矩，这也符合于执行电机的要求。

为了滿足以上两点要求，执行电机应有較高的轉子电阻。鼠籠式轉子的执行电机，其轉子导体应采用高比阻的材料(如青銅、黃銅)制成。用鋁合金做成的杯形轉子，如果尺寸选择适当，也很容易达到上述目的。

加大轉子电阻能够防止自運轉現象的原因，可以簡單說明如下。根据单相异步电动机理論，单相繞組产生的脉动磁場，可以分解为順序和逆序二旋轉磁場。順序旋轉磁場对轉子起电动机作用，产生正轉矩 M_1 ，逆序旋轉磁場对轉子起制動作用，产生負轉矩 M_2 。图1-4中， M_1 和 M_2 随轉差率 s

变化的曲綫用虛綫表示，合成轉矩 M 为 M_1 和 M_2 的代数和，用实綫表示。

图中的曲綫表示三种不同的情况。图 a) 即相当于普通单相异步电动机的运行情况，这时轉子的电阻不大，順序磁場所生的最大轉矩出現在 $s_m = 0.2$ 处。作为电动机运行时的合成轉矩曲綫切割橫軸二次，即当 $s = 1$ 和 $s = 0.02$ 时，或即当 $\nu = 0$ 和 $\nu = 0.98$ 时。設电动机原先在二相电压下運轉，随后将訊号电压取去，則当阻力轉矩小于合成轉矩的最高值

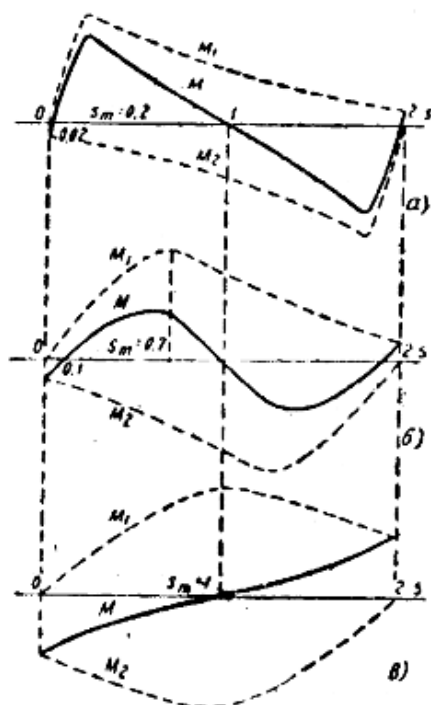


图 1-4 改变轉子电阻时对机械特性的影响

时，轉子仍將繼續運轉，不因訊号电压的消失而停止。設阻力轉矩為零，則電動机的空載轉速仍可上升至同步轉速的98%，亦即 $\nu_x=0.98$ 。图6)為轉子电阻加大以后的情形。这时順序磁場所生的最大轉矩出現在当 $s_m=0.7$ 处。合成磁場的最大轉矩降低得很多。但如阻力轉矩小于这一最大轉矩时，為訊号电压取去以后轉子仍將繼續運轉。空載轉速可达同步轉速的90%，亦即 $\nu_x=0.9$ 。以上两种情况均有自運轉現象，不能符合执行电机的要求。图6)所示的情况系把轉子电阻繼續加大，使順序磁場所生的最大轉矩出現在当 $s_m=1$ 处。这时合成轉矩曲綫仅只切割橫軸一次，即当 $s=1$ 时。在整个电动机运行范围以內($0 < s < 1$)，合成轉矩經常有負值，因而仅能起制动作用。当电动机原先在二相电压下運轉，一俟訊号电压取去以后，轉子便將受到制动而停止。也就是說，在这种情况下，电动机仅在单相电压的作用下不能運轉。由此可見，当順序磁場的 $s_m \geq 1$ 时，自運轉現象就不会发生。

执行电机是自动和遙控裝置中非常重要的元件，执行电机的质量对整个系統的工作质量有很大的影响。因此，除了以上二点必須滿足的特性外，对执行电机的运行还有一些其它的要求，就是：机械特性和調节特性曲綫有良好的直綫性，起動轉矩較大，控制功率小，反应灵敏以及工作可靠等。

第二节 交流执行电机的一般理論分析

执行电机工作性质的好坏，主要由电机的机械特性和調节特性是否符合工作要求来判断。此外，对电机需用的激磁功率和控制功率、机軸上产生的机械功率以及电机的效率，也应该有清楚的了解。机械特性是当控制电压不变时，轉矩

和轉速的關係；調節特性是當轉矩不變時，轉速隨控制電壓變化的關係。為了研究以上特性，應該對執行電機的參數、電流、電壓及功率間的關係等首先加以分析。

一、執行電機的對稱分量分析

圖 1-5 表示一個二相執行電動機， B 為激磁繞組，其有效匝數為 w_B ； y 為控制繞組，其有效匝數為 w_y 。 w_B 與 w_y 一般不相等，

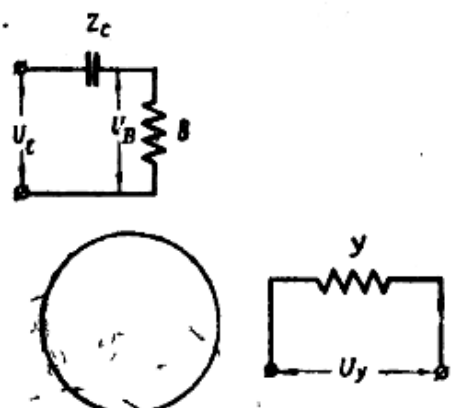


圖 1-5 二相執行電機

比 $k = \frac{w_B}{w_y}$ 。 U_c 為電壓， U_B 為激磁繞組兩端的電壓；

U_y 為控制繞組兩端的電壓。為了使以下分析具有普遍意義起見，激磁回路中串聯一電容器，電容器的阻抗為 Z_c 。

當電流 I_y 流過繞組 y 時，便產生一磁勢 F_y 。當電流 I_B 流過繞組 B 時，便產生一磁勢 F_B 。因為繞組 B 和繞組 y 在空間相距 90° ，若電流 I_B 與 I_y 在時間上有一相角差 β ，則 F_B 與 F_y 在空間便將形成一合成旋轉磁勢。

一般說來，在執行電機二繞組上所加的電壓 U_B 和 U_y ，流過該二繞組的電流 I_B 和 I_y ，以及由此產生的磁勢 F_B 和 F_y ，都不是對稱的；就是說，二電壓（或電流，磁勢）的大小不相等，相角差也不是 90° 。由旋轉磁勢理論可知，此時空氣隙中的旋轉磁勢是橢圓形的。

應用對稱分量法，可將二相不對稱系統 F_B 和 F_y ，分解為兩組二相對稱系統。一組是由 F_{B1} 和 F_{y1} 所組成的順序磁勢系統，一組是由 F_{B2} 和 F_{y2} 所組成的逆序磁勢系統，二者在空

气隙中各自产生一圆形旋轉磁势，但是旋轉方向一为正向，一为反向。二圆形旋轉磁势对电机的作用迭加起来，和椭圆形旋轉磁势对电机的作用是等值的。此时：

$$\left. \begin{aligned} F_B &= F_{B1} + F_{B2}; \\ F_y &= F_{y1} + F_{y2}. \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

如以相序 $B-y$ 为順序，相序 $y-B$ 为逆序，則对称分量 F_{B1} 和 F_{y1} ； F_{B2} 与 F_{y2} 应滿足下列关系：

$$\left. \begin{aligned} F_{y1} &= -jF_{B1}; \\ F_{y2} &= jF_{B2}. \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

根据式(1-1)和式(1-2)的关系，可以得到各磁势分量为：

$$\left. \begin{aligned} F_{B1} &= \frac{1}{2}(F_B + jF_y); \\ F_{B2} &= \frac{1}{2}(F_B - jF_y); \\ F_{y1} &= -jF_{B1} = \frac{1}{2}(F_y - jF_B); \\ F_{y2} &= jF_{B2} = \frac{1}{2}(F_y + jF_B). \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

图 1-6 清楚示出，磁势 F_B 、 F_y 和各个对称分量之間的相互关系。由于磁势为电流与繞組匝数的乘积，式(1-3)也可写作：

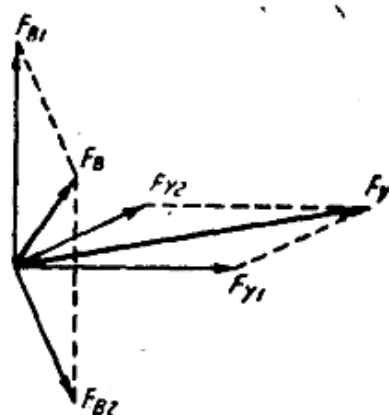


图 1-6 用对称分量法分解磁势

$$w_B I_{B1} = \frac{1}{2}(w_B I_B + jw_y I_y);$$

$$w_B I_{B2} = \frac{1}{2}(w_B I_B - jw_y I_y);$$

$$w_y I_{y1} = \frac{1}{2}(w_y I_y - jw_B I_B);$$

$$w_y I_{y2} = \frac{1}{2}(w_y I_y + jw_B I_B).$$

在以上各式中代入变比 $k = \frac{w_B}{w_y}$ 的关系，即可求得电流的对称分量的表示式为：

$$\left. \begin{aligned} kI_{B1} &= \frac{1}{2}(kI_B + jI_y); \\ kI_{B2} &= \frac{1}{2}(kI_B - jI_y); \\ I_{y1} &= \frac{1}{2}(I_y - jkI_B); \\ I_{y2} &= \frac{1}{2}(I_y + jkI_B). \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

在激磁繞組和控制繞組中的电流各为：

$$\left. \begin{aligned} kI_B &= kI_{B1} + kI_{B2}; \\ I_y &= I_{y1} + I_{y2}. \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

順序圓形旋轉磁勢所产生的磁場以同步速率在空間旋轉，因而在激磁繞組中感应一电势 E_{B1} ，在控制繞組中感应一电势 E_{y1} ，因为以 $B-y$ 为順序系統， E_{B1} 在時間上較 E_{y1} 超前 90° 。同时，由于激磁繞組的有效匝数較控制繞組的有效匝数相差 k 倍，故 $|E_{B1}| = k|E_{y1}|$ 。如用复数表示，則为

$$E_{B1} = jkE_{y1}. \quad (1-6)$$

同理，逆序圓形旋轉磁勢所生的磁場在激磁繞組中感应一电势 E_{B2} ，在控制繞組中感应一电势 E_{y2} ， E_{B2} 在時間上較 E_{y2} 滞后 90° ，二感应电势的大小同样相差 k 倍，即 $|E_{B2}| = k|E_{y2}|$ 。用复数表示时，則有：

$$E_{B2} = -jkE_{y2}. \quad (1-7)$$

利用迭加原理，在激磁繞組和控制繞組中的感应电势各为：

$$\left. \begin{aligned} E_B &= E_{B1} + E_{B2}; \\ E_y &= E_{y1} + E_{y2}. \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

以上分析說明，二相执行电机在不对称运行时，二繞組中的电流、磁势和感应电势都是不对称的。应用对称分量法，可以将他們分解为各自的对称分量系統，这些对称分量系統相互間有密切联系，从物理概念上解釋也是完全一致的。电流 kI_B 和 I_y 的分解相应于磁势 F_B 和 F_y 的分解；分解后，电机中椭圆形旋轉磁場的作用就可以用两个方向相反的圓形旋轉磁場的作用之和来代替。进一步，由于磁場的分解，繞組中实有的感应电势 E_B 和 E_y 也有了相应的对称分量系統。

二、等值綫路和电压方程式

在普通异步电动机理論中說明，电动机在对称运行（对称繞組接至对称电源）时，可以用单一的等值綫路来表示。

执行电机一般在不对称情况下工作。不对称运行可以分解为順序和逆序两种对称运行的迭加，因此，等值綫路也就相应地有順序网络和逆序网络。执行电机的二相繞組一般是不对称的（例如匝数不等），所以他們的等值綫路也不能用一相来表示。結果，执行电机的工作一般由四个等值綫路来表示。

根据以上說明，参照普通异步电动机的等值綫路，可以繪出执行电机的感应电势 E_{y1} 、 E_{y2} 、 E_{B1} 、 E_{B2} 的等值綫路，如图1-7所示。

图中：

- r_{Ry} 与 x_{Ry} 为轉子电阻与漏抗归算到控制繞組的数值；
- r_{RB} 与 x_{RB} 为轉子电阻与漏抗归算到激磁繞組的数值；
- s 为轉子对順序旋轉磁場的轉差率；
- $2-s$ 为轉子对逆序旋轉磁場的轉差率；
- x_{my} 为控制繞組的激磁电抗；
- x_{mB} 为激磁繞組的激磁电抗。

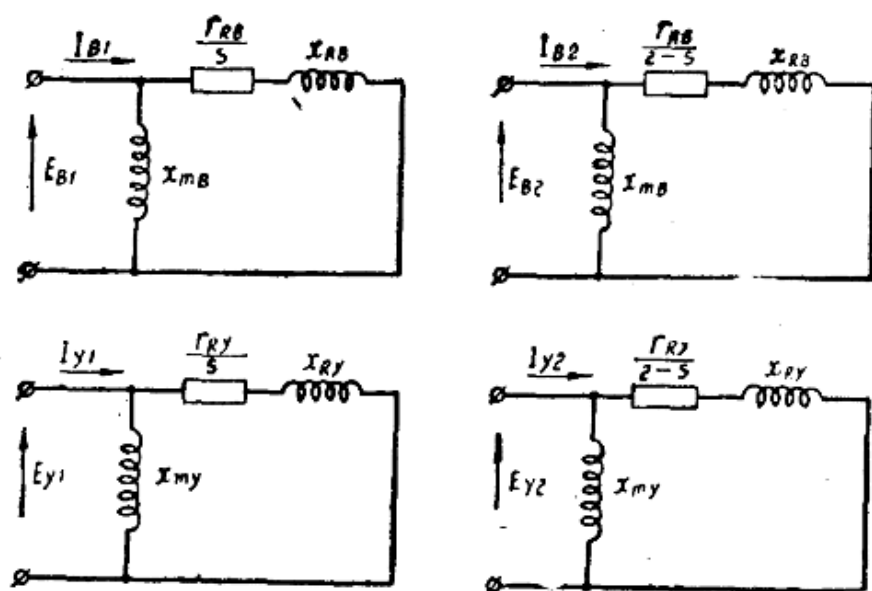


图 1-7 感应电势的等值线路

实际上作用在控制绕组上的外施电压，除了需平衡该绕组中的感应电势以外，尚需平衡该绕组中电阻和漏抗 $Z_{sy} = r_{sy} + jx_{sy}$ 上的电压降。作用在激磁回路上的外施电压，除了需平衡激磁绕组中的感应电势以外，尚需平衡该绕组中电阻和漏抗 $Z_{sB} = r_{sB} + jx_{sB}$ 上的电压降，以及串联电容 Z_c 上的电压降（如有串联电容时）。因此有：

$$\left. \begin{aligned} U_y &= I_y Z_{sy} + E_{y1} + E_{y2}; \\ U_c &= I_B (Z_{sB} + Z_c) + E_{B1} + E_{B2}. \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

由此，执行电机四个完整的等值线路应该如图1-8所示。

为了简化分析，图1-7及1-8中各等值线路的激磁支路仅有电抗，没有电阻，也就是说，忽略了电机中铁芯损耗的影响。此外，饱和现象和高次谐波磁场的影响也被忽略不计。

在空心转子执行电机中，因为转子绕组就是杯形转子，在结构上不是放在铁芯的槽中。转子周围均是气隙，为非铁磁物质，转子漏磁通所遇的磁阻甚大，因而转子漏抗甚小。

另一方面，执行电机的工作特性，要求轉子有甚大的电阻。所以在图 1-7 及 1-8 中， x_{RV} 及 x_{RB} 如与 r_{RV} 及 r_{RB} 相較时，数值很小，可以忽略。

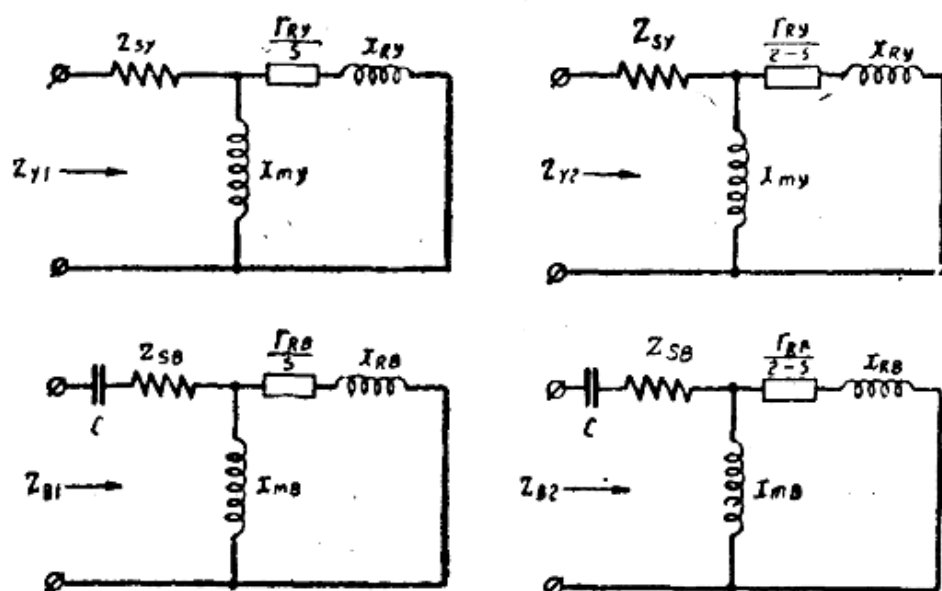


图 1-8 全阻抗的等值线路

根据图 1-6，可令

$$\left. \begin{aligned} \frac{E_{Y1}}{I_{Y1}} &= Z'_{RV1} = r'_{RV1} + jx'_{RV1}; \\ \frac{E_{Y2}}{I_{Y2}} &= Z'_{RV2} = r'_{RV2} + jx'_{RV2}; \\ \frac{E_{B1}}{I_{B1}} &= Z'_{RB1} = r'_{RB1} + jx'_{RB1}; \\ \frac{E_{B2}}{I_{B2}} &= Z'_{RB2} = r'_{RB2} + jx'_{RB2}. \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式中 Z'_{RV1} 、 Z'_{RV2} 、 Z'_{RB1} 及 Z'_{RB2} 为在各等值线路中把轉子回路和激磁回路并联以后的合成阻抗。忽略 x_{RV} 及 x_{RB} ，可以得到各合成阻抗的电阻和电抗表示式如下；