

# 第二章 直流电机

## 2-1 概述



直流电机是电机的主要类型之一。一台直流电机既可作为发电机使用，也可作为电动机使用。

**用作发电机:**可以获得直流电源

**用作电动机:**由于其具有良好的调速性能，在许多调速性能要求较高的场合，得到广泛使用。

**信号传递:** 直流**测速发电机**将机械信号转换为电信号

**信号传递:** 直流**伺服电动机**将控制信号转换为机械信号。



# 直流电机的优缺点

- ✚ 直流发电机的电势波形较好，受电磁干扰的影响小。
- ✚ 直流电动机的调速范围宽广，调速特性平滑。
- ✚ 直流电动机过载能力较强，起动和制动转矩较大。
- ✚ 由于存在换向器，其制造复杂，价格较高。



与异步电动机相比，直流电动机的结构复杂，使用和维护不如异步机方便，而且要使用直流电源。

### 直流电机的优点：

- (1) 调速性能好:调速范围广，易于平滑调节。
- (2) 起动、制动转矩大，易于快速起动、停车。
- (3) 易于控制。

### 应用：

- (1) 轧钢机、电气机车、无轨电车、中大型龙门刨床等调速范围大的大型设备。
- (2) 用蓄电池做电源的地方，如汽车、拖拉机等。
- (3) 家庭：电动缝纫机、电动自行车、电动玩具



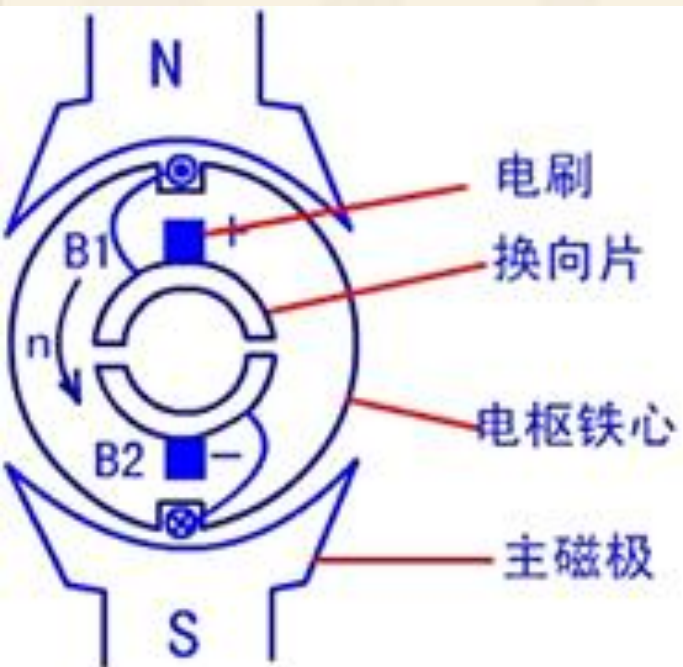
表 7.2 典型生产机械选用电动机的实例

电动机种类		机械特性	优点	缺点	典型机械的例子
交流电动机	鼠笼式异步	硬	结构简单、体积小、价廉、运行可靠、维护使用方便。	调速装置较复杂、较贵。	泵、通风机、运输机、机床的辅助运动机构、小型机床的主传动等。
	线绕式异步	硬 (转子串电阻后变软)	启动性能好、可在小范围内调速。	结构较复杂、较贵。	起重机、电梯、大中型卷扬机、锻压机等。
	同步	绝对硬	恒速、能改善电网功率因数。	结构复杂、价贵，调速较复杂，操作较烦。	大中型鼓风机、泵、压缩机、连续式轧钢机、球磨机等。
直流电动机	他励并励	(电枢串电阻后变软)	调速平滑、范围宽、启动转矩大。	需要直流电源，结构复杂、价贵，可靠性较差。	大型机床(如车、铣、刨、磨、镗)可逆轧钢机、造纸机、印刷机等。
	串励复励	软 较软	启动转矩大、负载变化时能自动调节转速。	同上	电车、电动机车、起重机、卷扬机、剪床、冲床等。

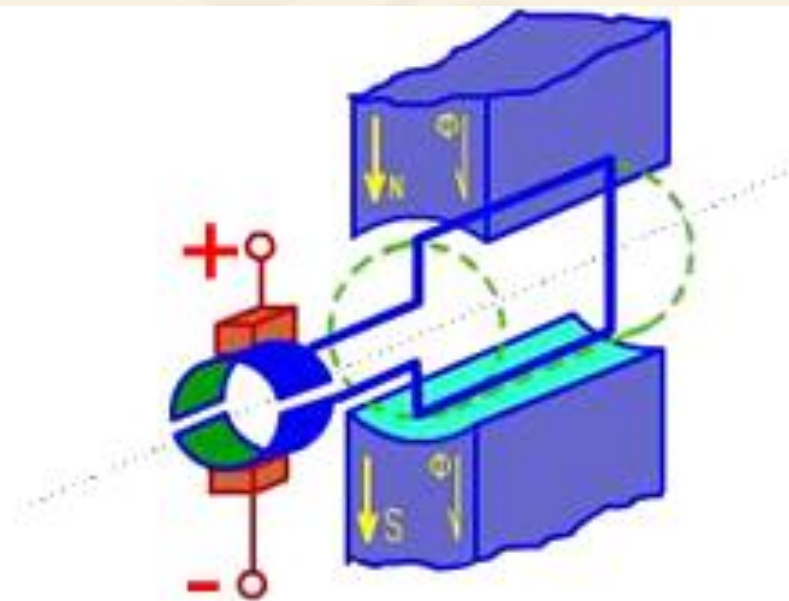


## 2.1.1 电流电机的工作原理

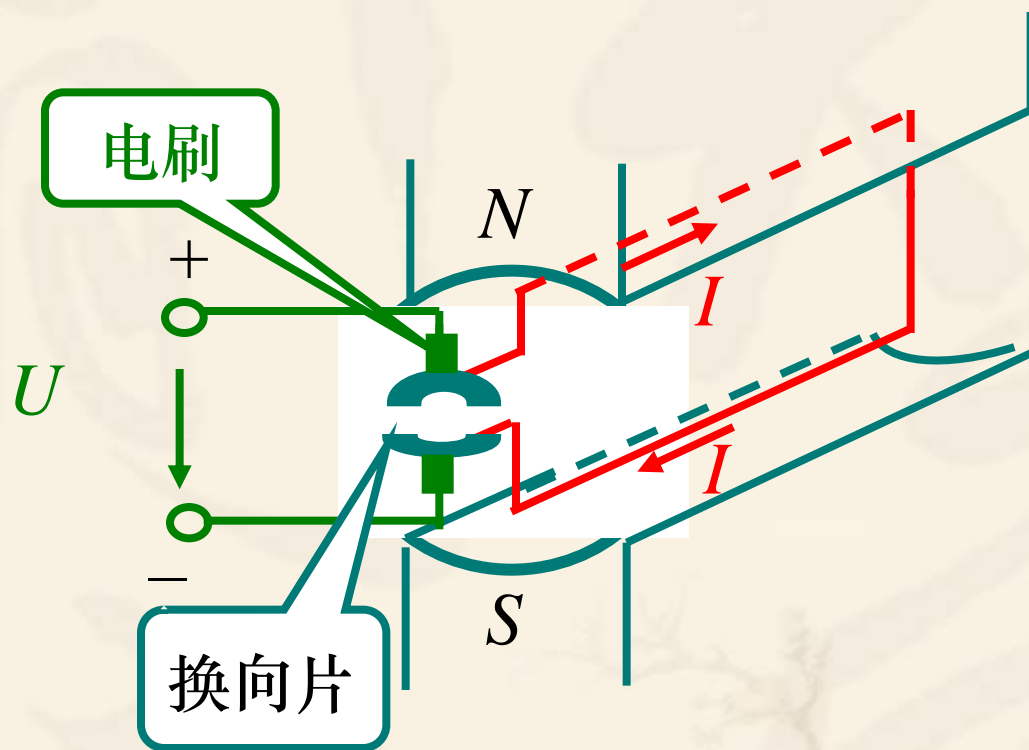
### 一、直流电动势的产生



### 物理模型图



# 1、电动机



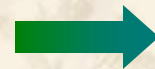
直流电源



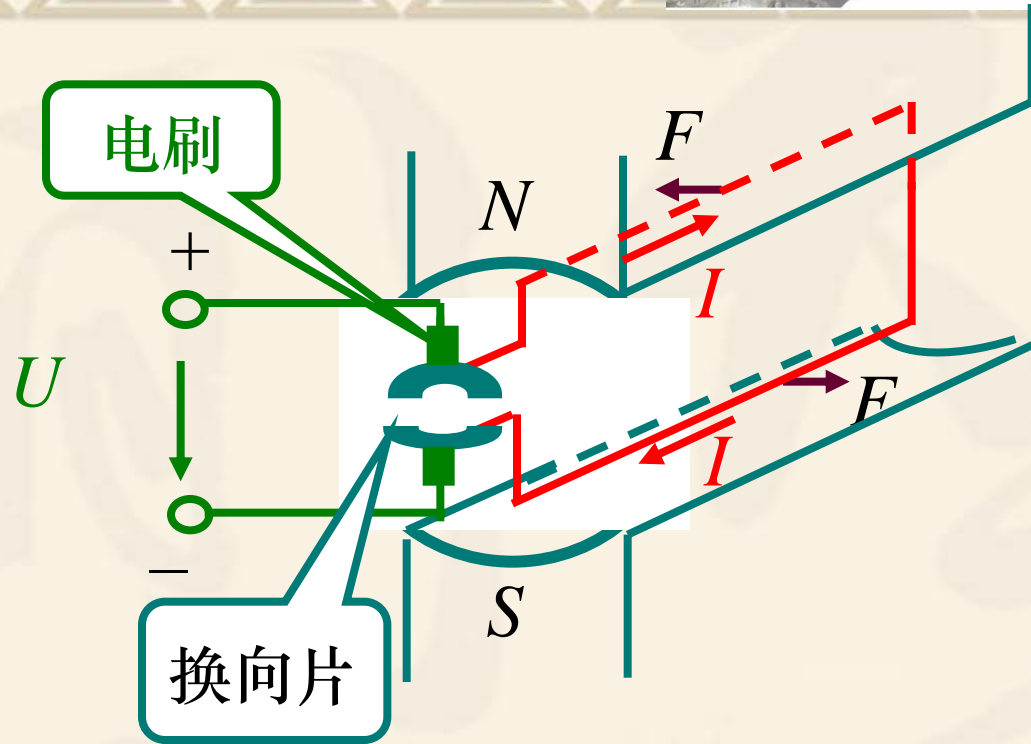
电刷



换向器



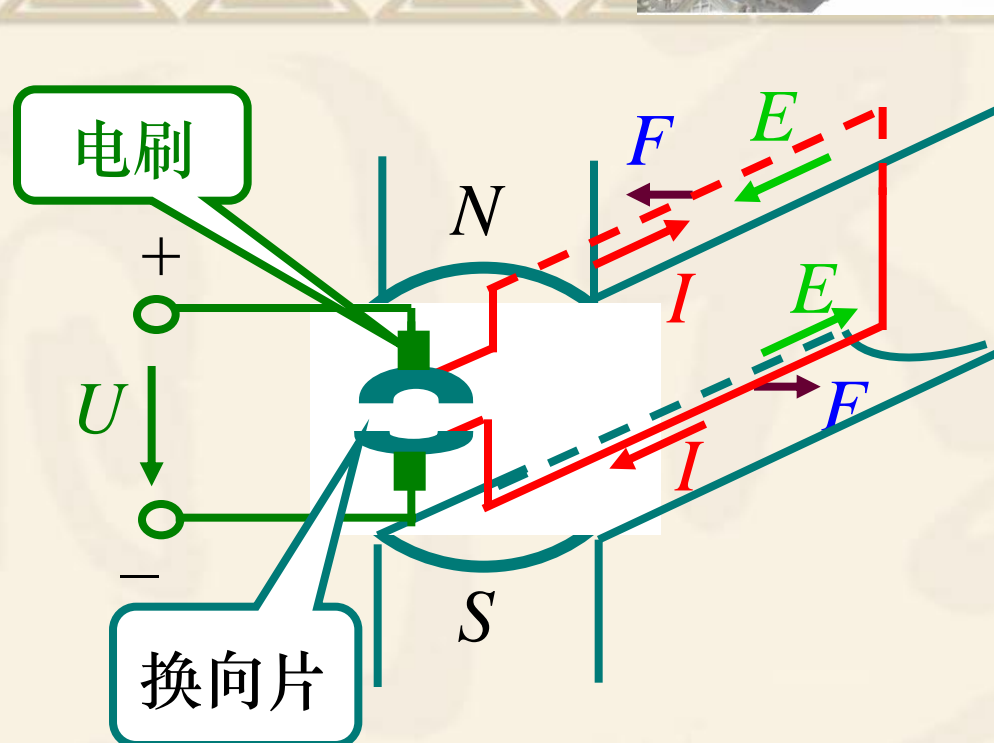
线圈



**注意：**换向片和电源固定联接，线圈无论怎样转动，总是上半边的电流向里，下半边的电流向外。电刷压在换向片上。

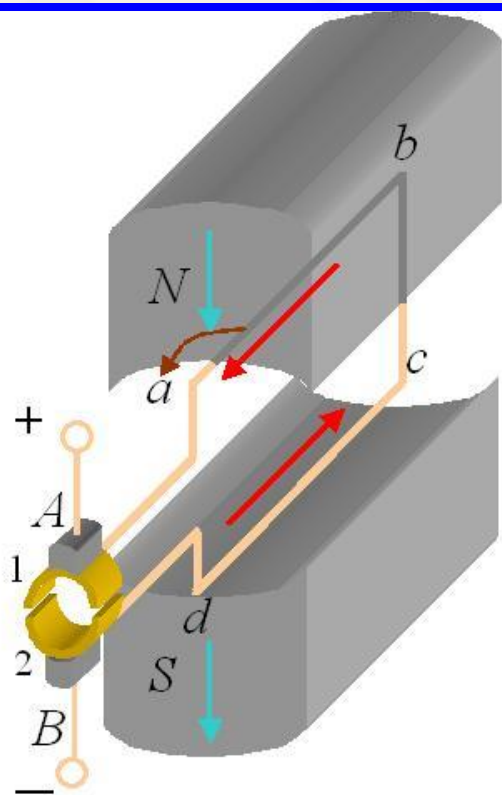
由左手定则，通电线圈在磁场的作用下，使线圈逆时针旋转。





由右手定则，线圈在磁场中旋转，将在线圈中产生感应电动势，感应电动势的方向与电流的方向相反。

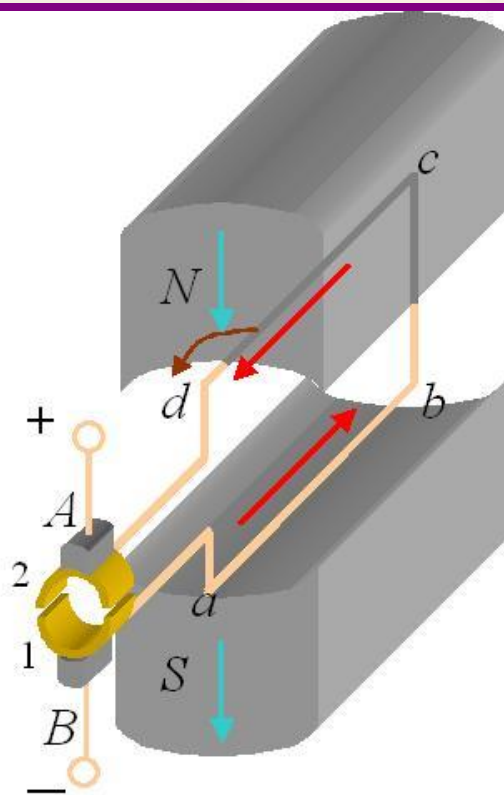
## 2、发电机



图解：

N,S 为磁极，不动  
abcd 为线圈，旋转  
1,2 为换向片，旋转  
A,B 为电刷，不动

导体（圈边） $ab$ 处于N极下时 $A+B-$



图解：

N,S 为磁极，不动  
abcd 为线圈，旋转  
1,2 为换向片，旋转  
A,B 为电刷，不动

导体（圈边） $ab$ 处于S极下时 $A+B-$



为了得到稳定的直流电势，直流电机的电枢圆周上一般会有多个线圈分布在不同的位置，并通过多个换向片联接成电枢绕组。

问题1：直流电机电枢单个导体中感应电势的性质？

问题2：直流电机通过电刷引出的感应电势的性质？

问题3：直流发电机如何得到幅值较为恒定的直流电势？

换向器  
的作用



## 2.1.2 直流电机的主要结构部件

旋转电机都是由定子和转子两大部分组成

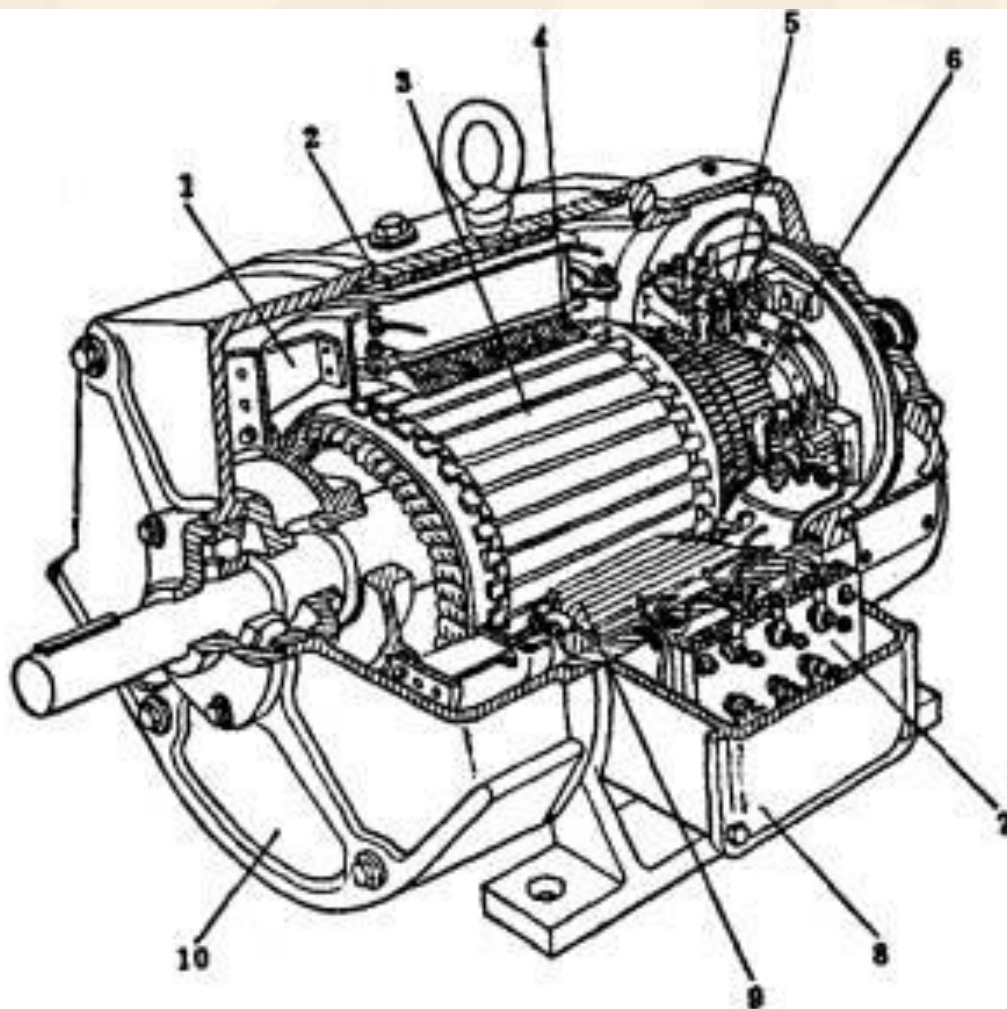


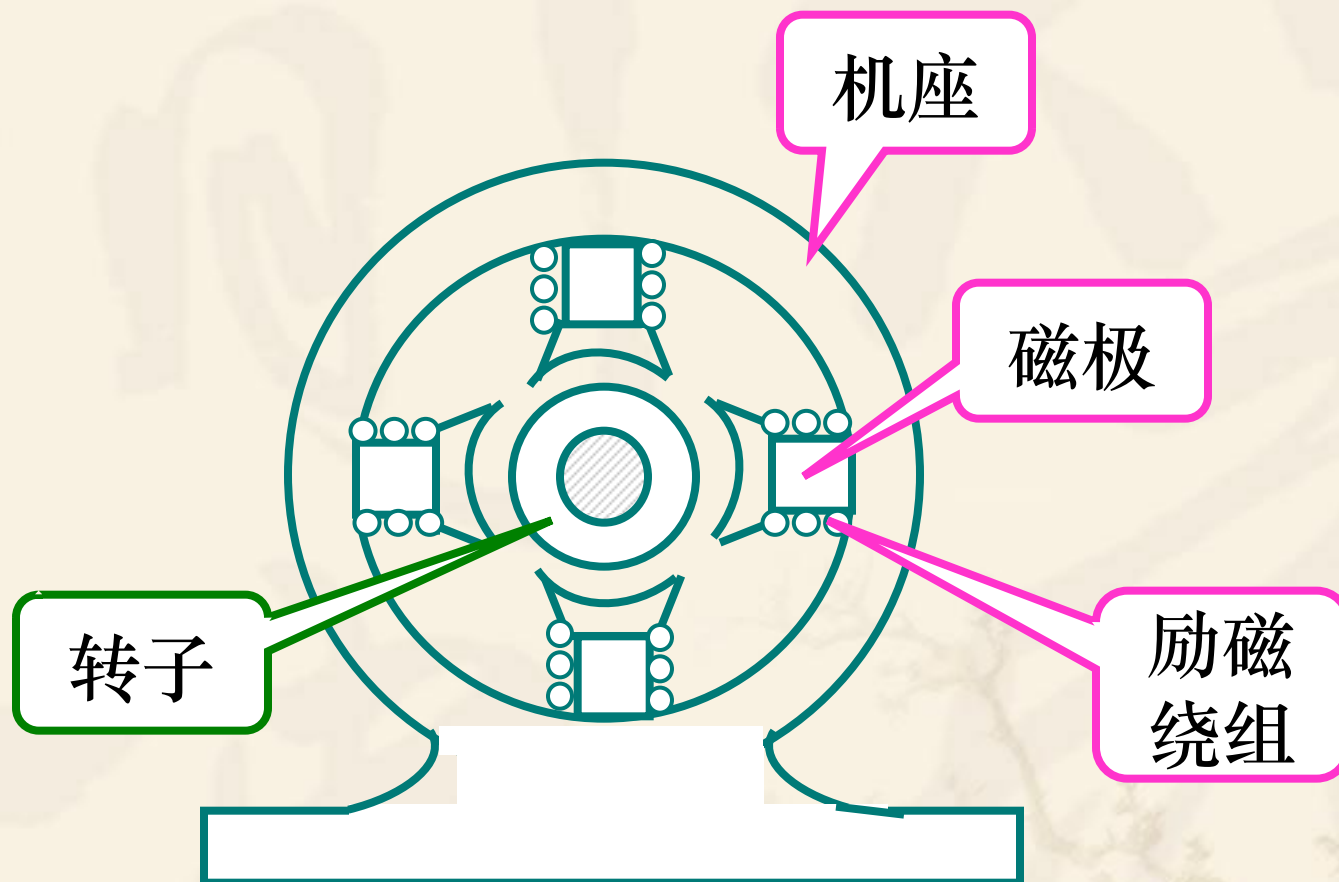
图 2.7 直流电机的结构图

1—风扇 2—机座 3—电枢 4—主磁极 5—刷架  
6—换向器 7—接线板 8—出线盒 9—换向板 10—端盖





直流电机由定子、转子和机座等部分构成。



励磁式直流电动机结构



# 一、定子部分

主极的作用是在定转子之间的气隙中建立磁场,使电枢绕组在此磁场的作用下感应电动势和产生电磁转矩.

换

磁

~

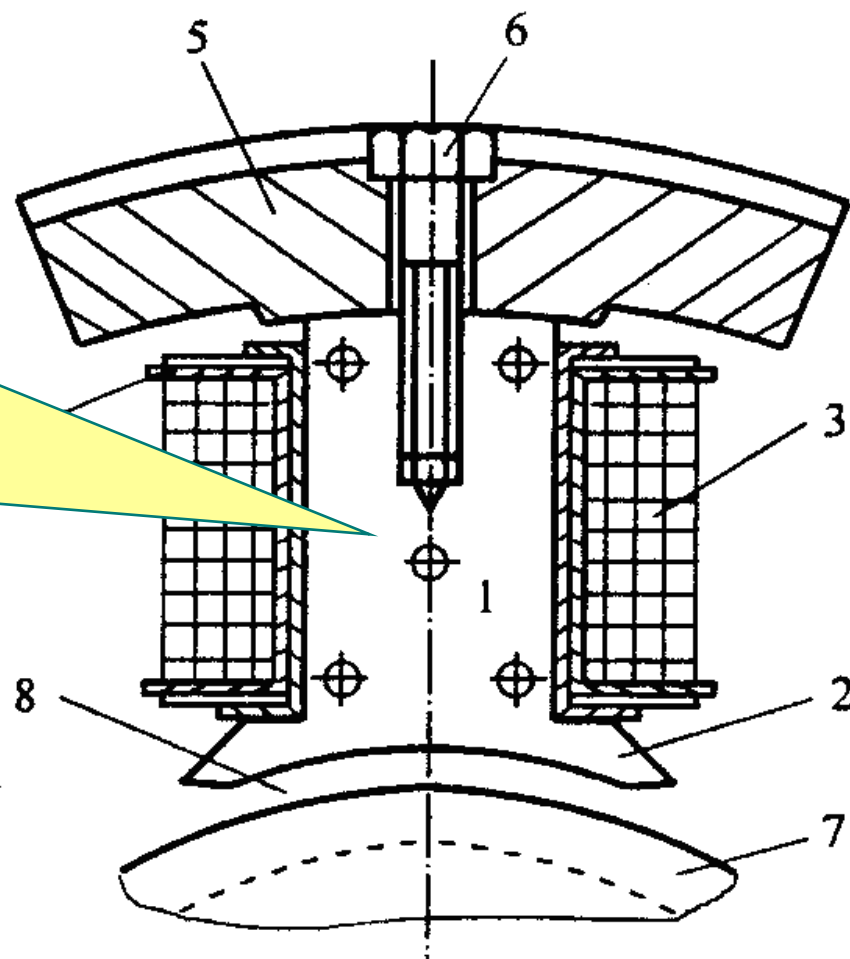


图 2.8 主磁极

- 1— 主极铁心    2— 极靴    3— 励磁绕组  
4— 绕组绝缘    5— 机座    6— 螺杆  
7— 电枢铁心    8— 气隙

1.2mm厚的低碳钢板叠压而成。整个磁极用螺钉固定在机座上。



2) 换向极：换向极又称附加极或间极,其作用是用以改善换向。换向极装在相邻两主极之间，它也是由铁心和绕组构成。

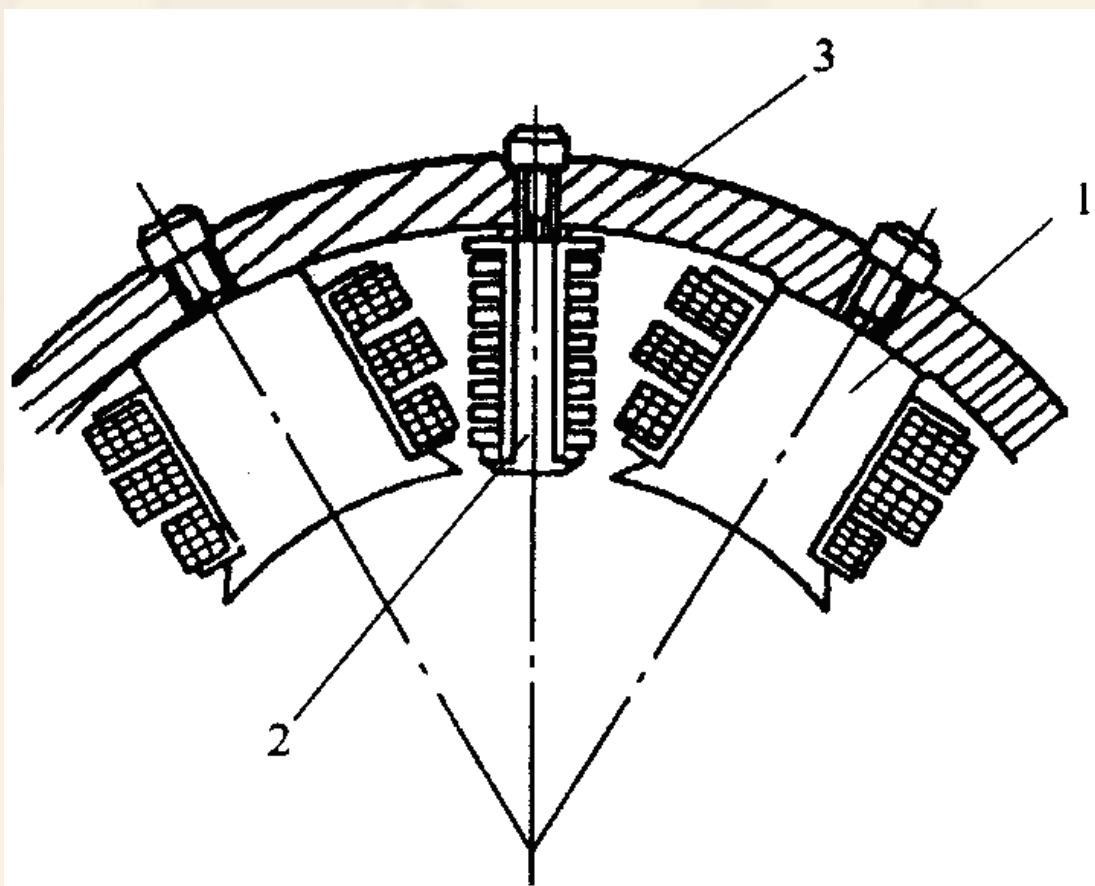


图 2.9 电机中的主极和换向极

1— 主极    2— 换向极    3— 磁轭

3) 机座：一是作为电机磁路系统中的一部分，二是用来固定主磁极、换向极及端盖等，起机械支承的作用。因此要求机座有好的导磁性能及足够的机械强度与刚度。机座通常用铸钢或厚钢板焊成。

4) 电刷装置：电刷的作用是把转动的电枢绕组与静止的外电路相连接，并与换向器相配合，起到整流或逆变器的作用。





## 二、转子部分

转子又称为电枢，包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、风扇、轴和轴承等。

1) 电枢铁心：示电机主磁路的一部分，用来嵌放电枢绕组的，为了减少电枢旋转时电枢铁心中因磁通变化而引起的磁滞及涡流损耗，电枢铁心通常用0.5mm厚的两面涂有绝缘漆的硅钢片叠压而成。

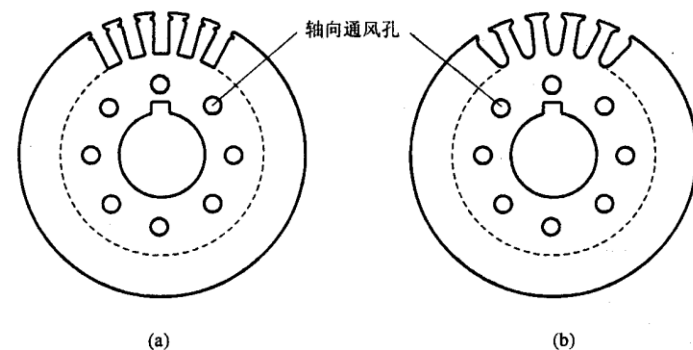


图 2.11 电枢铁心冲片

(a) 矩形槽 (b) 梨形槽

**2) 电枢绕组：**电枢绕组叠放在电枢铁心的槽内,是由按一定规律联接的线圈组成.它是直流电机的电路部分.上、下层之间及线圈与铁心之间都要有绝缘,槽口处用槽楔压紧。电枢绕组通过电流和感应电动势，是实现机电能量转换的关键性部件。

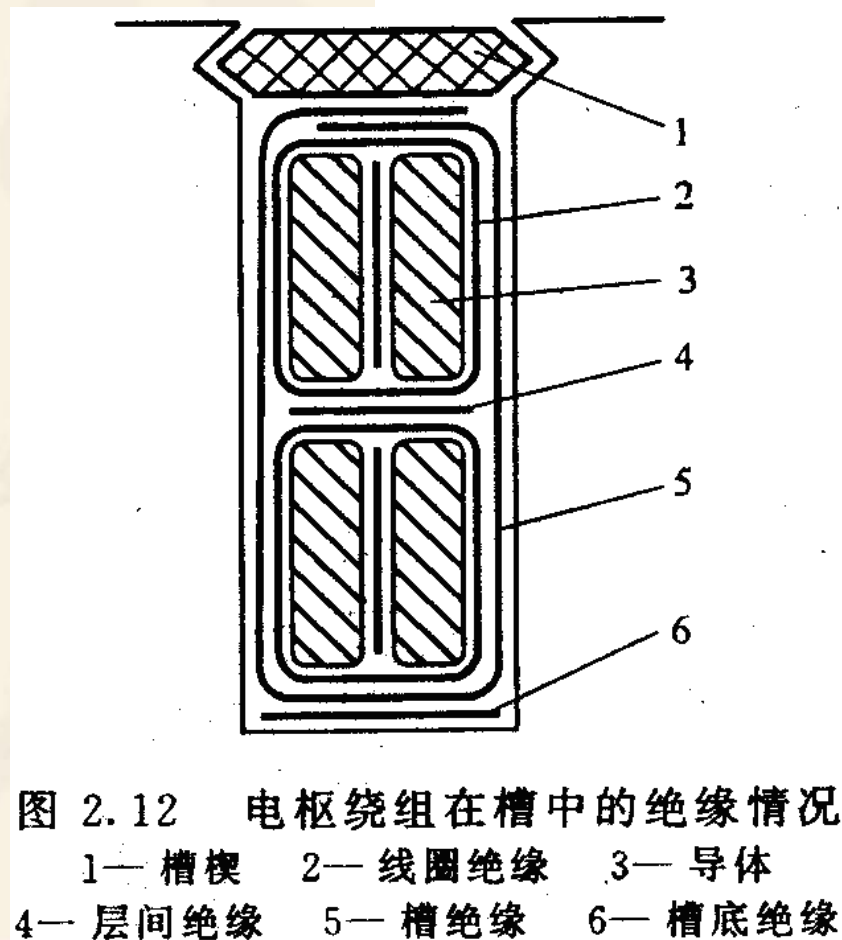
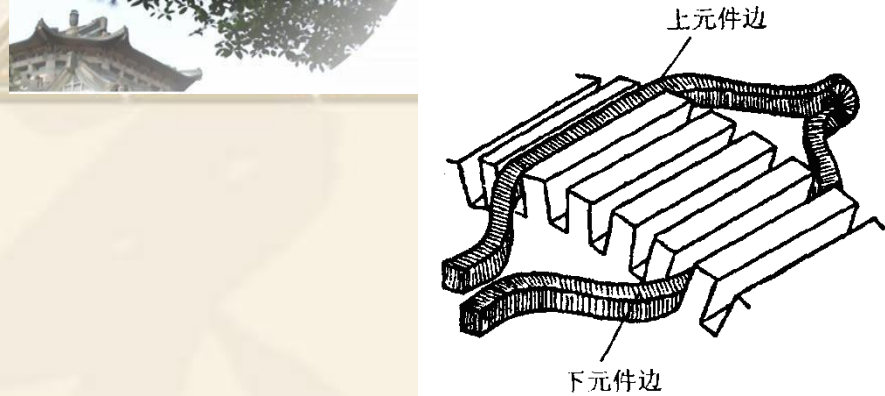


图 2.12 电枢绕组在槽中的绝缘情况  
1— 槽楔 2— 线圈绝缘 3— 导体  
4— 层间绝缘 5— 槽绝缘 6— 槽底绝缘



(3) 换向器 换向器也是直流电机的重要部件，在发电机中可将电枢绕组中交变的电流转换成电刷上的直流，起整流作用，而在直流电动机中将电刷上的直流变为电枢绕组内的交流，即起逆变作用。换向器由许多换向片组成，片间用云母绝缘，电枢绕组的每个线圈的两端分别接到两个换向片上。

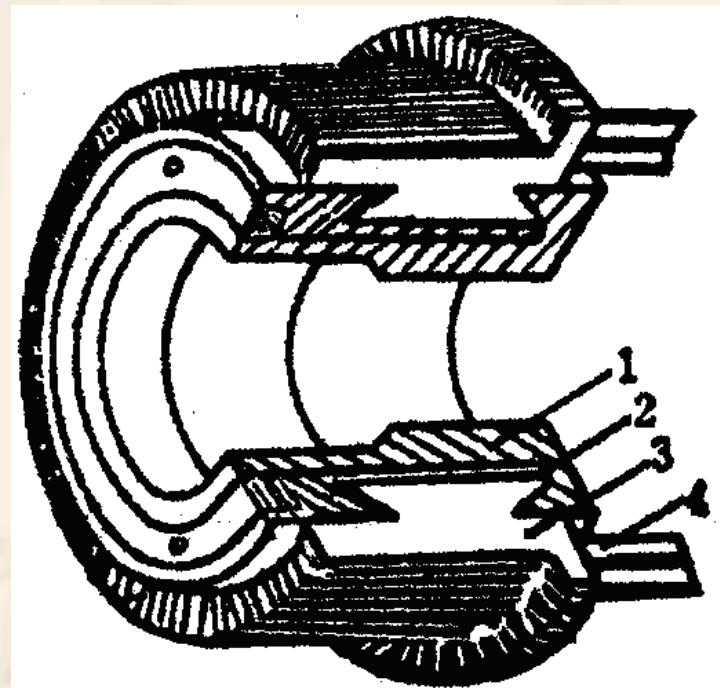


图 2.13 换向器  
1—V 形套筒 2—云母环  
3—换向片 4—连接片





## 直流电机的定子 装配图







## 2.1.3 直流电机的额定值

为使电机安全可靠地工作，且保持优良的运行性能，电机厂家根据国家标准及电机设计数据，对每台电机在运行中的电压、电流、功率、转速等规定了保证值，这些保证值称为电机的额定值。直流电机的额定值有：

1. 额定容量  $P_N$  (功率) (kW)
2. 额定电压  $U_N$  (V) ;
3. 额定电流  $I_N$  (A) ;
4. 额定转速  $n_N$  (r/min) ;
5. 励磁方式和额定励磁电流  $I_{fN}$  (A)



**注意：额定容量，对直流发电机来说，是指电刷端输出的电功率，对直流电动机来说，是指轴上输出的机械功率。**

**直流发电机的额定容量为：**

$$P_N = U_N I_N$$

**直流电动机的额定功率为：**

$$P_N = U_N I_N \eta_N$$



## 2.2 直流电机的电枢绕组

电枢绕组是直流电机的核心部分，在电机的机电能量转换过程中起着重要的作用。

因此，电枢绕组须满足以下要求：

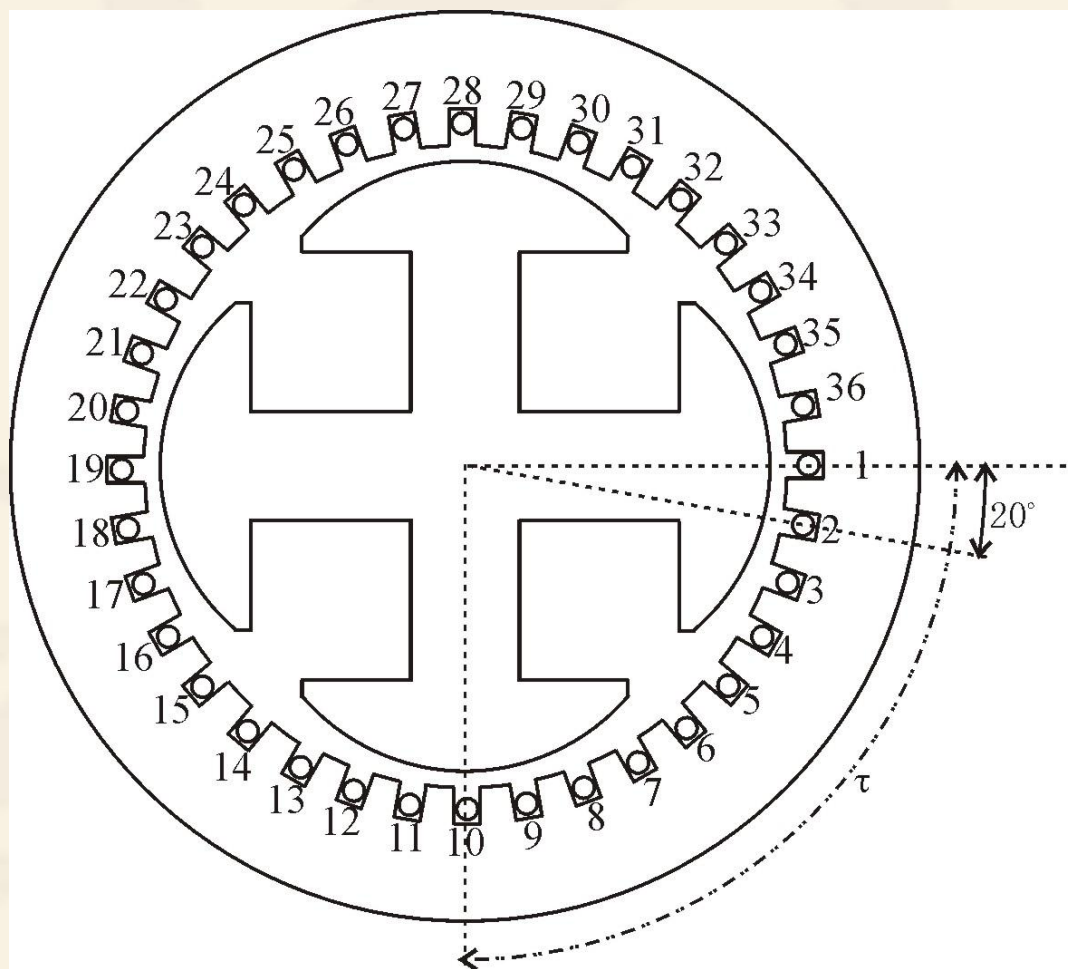
- a) 在能通过规定的电流和产生足够的电动势前提下，尽可能节省有色金属和绝缘材料；
- b) 结构简单，运行可靠。

电枢绕组分： 1.叠绕组 2.波绕组 3.混和绕组

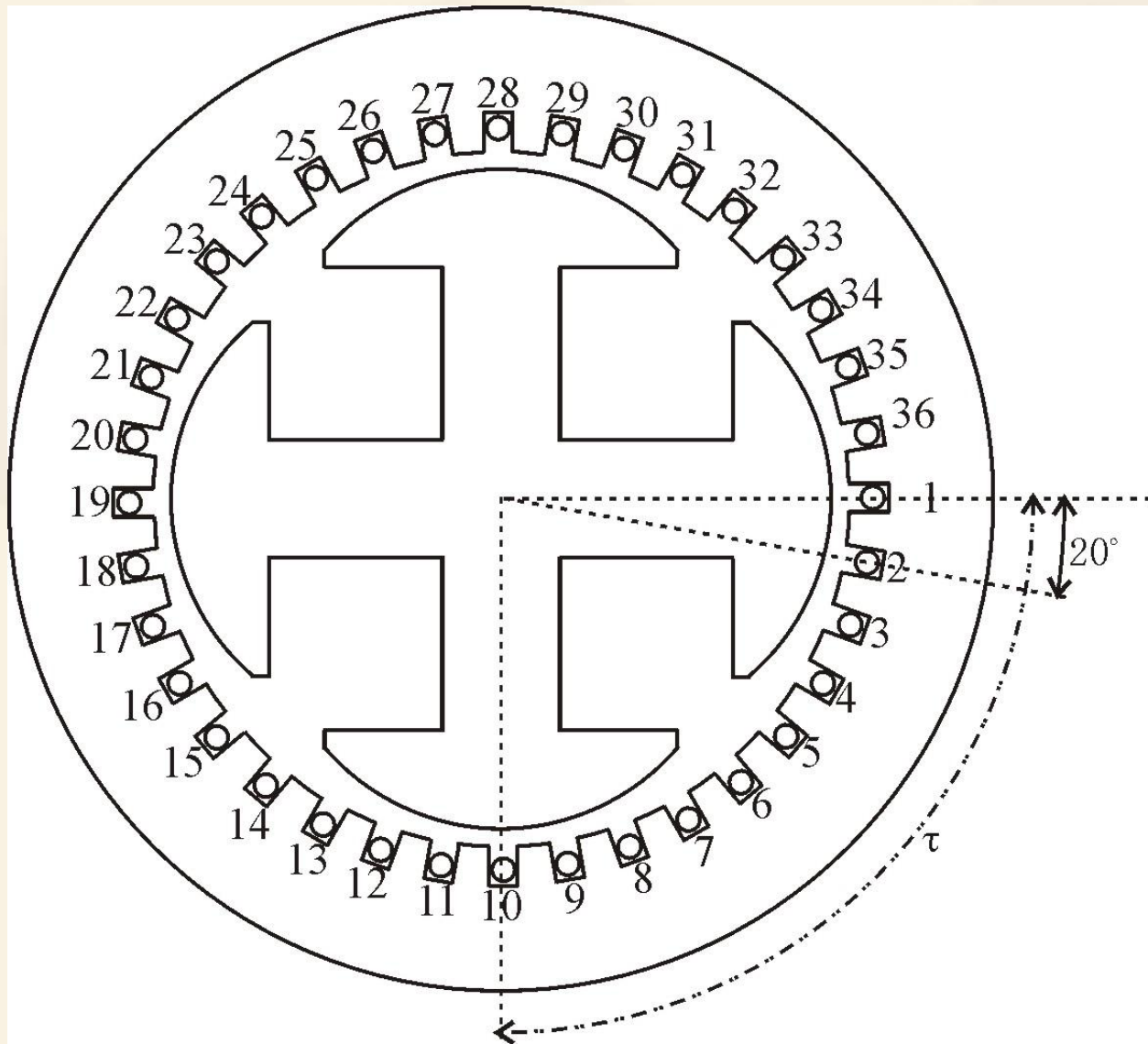


# 1 名词术语介绍

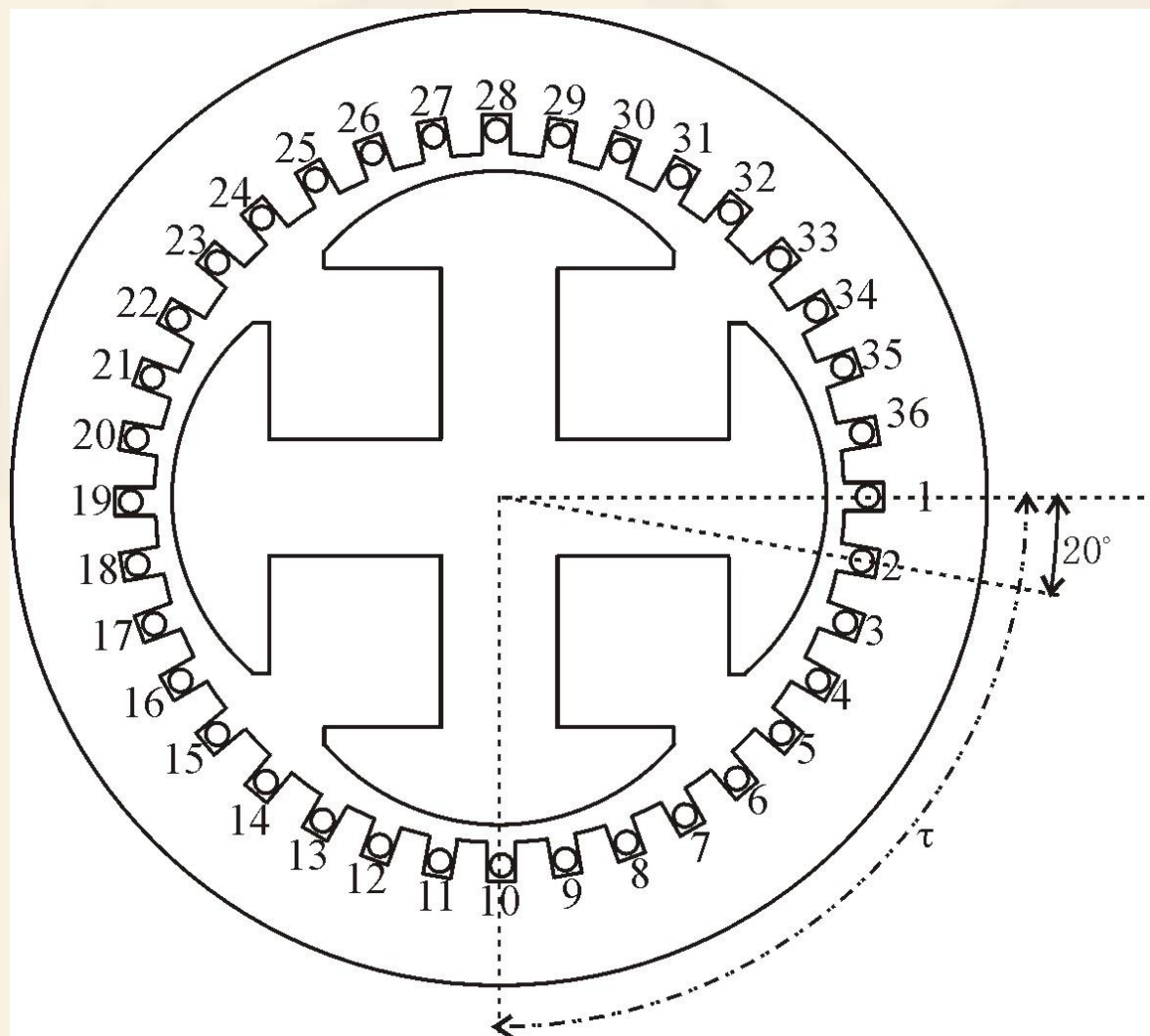
(1) **极对数**：指电机主磁极的对数，通常用 $p$ 表示。







**(2) 机械角度:**  
一个圆周真正的空间角度为机械角度  $360^\circ$

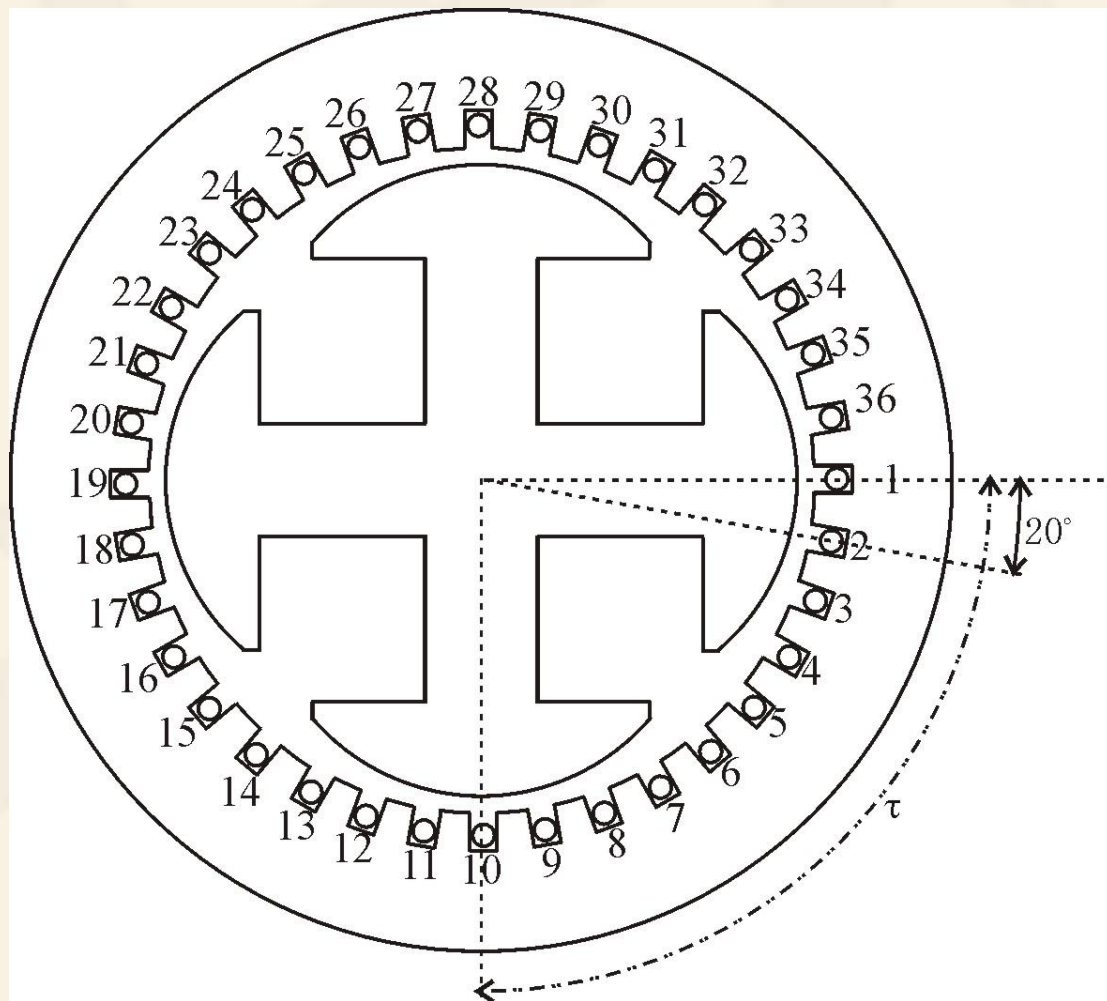


**(3) 电角度：**在电机理论中，我们把一对主磁极所占的空间距离，称为  $360^\circ$  的空间电角度。电角度 = 极对数  $\times$  机械角度。



**(4) 槽距角：**  
相邻两槽间的距离用电角度表示，叫做槽距角，用 $\alpha$ 表示。

$$\alpha = \frac{p \times 360^\circ}{Z}$$







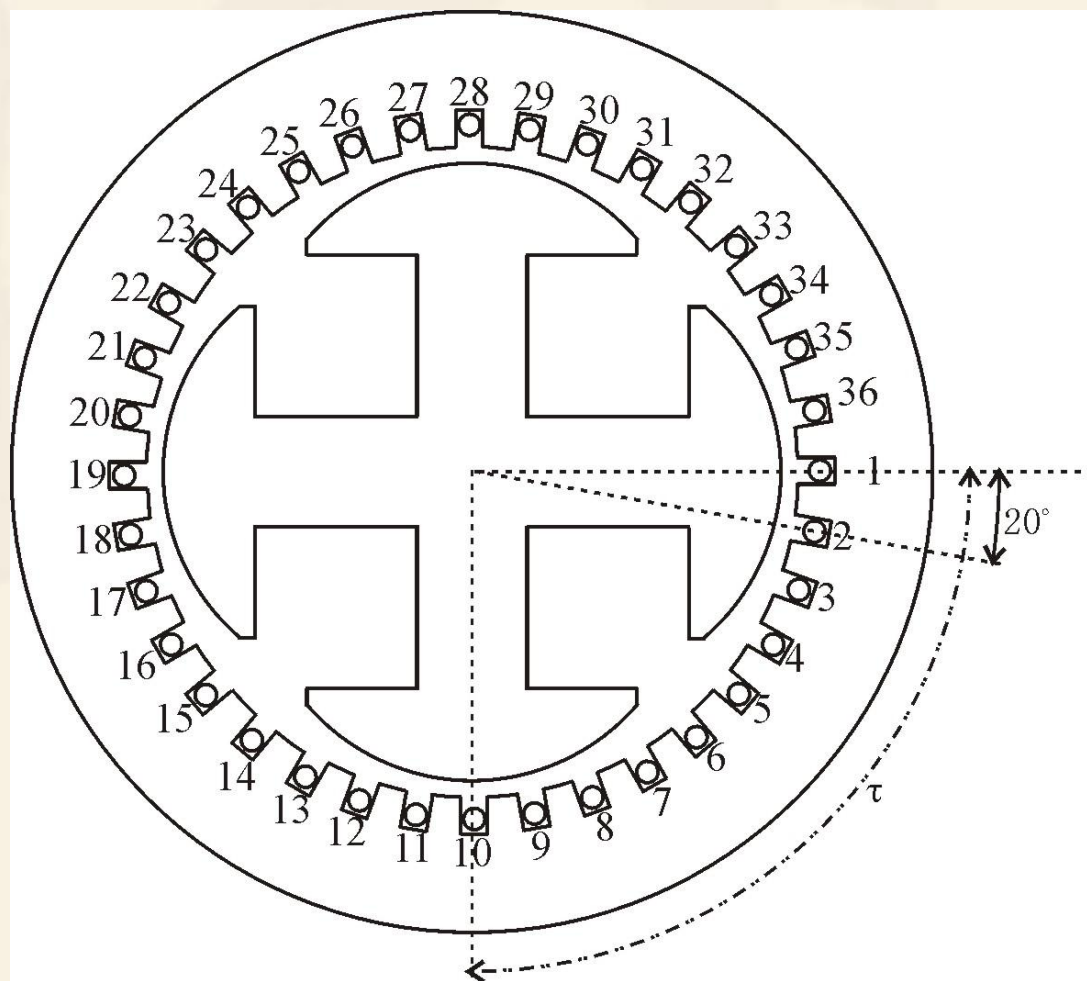
**(5) 极距：**指电机一个主磁极在电枢表面所占的长度。

用槽数表示

$$\tau = \frac{Z_i}{2p}$$

**(6) 槽和虚槽：**一个实际的槽就包含  $u$  个“虚槽”。

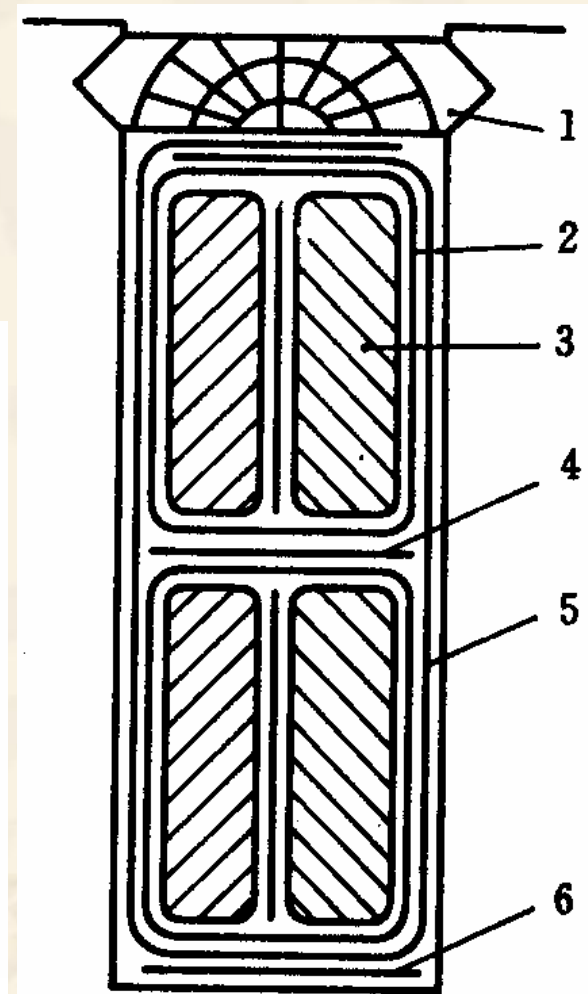
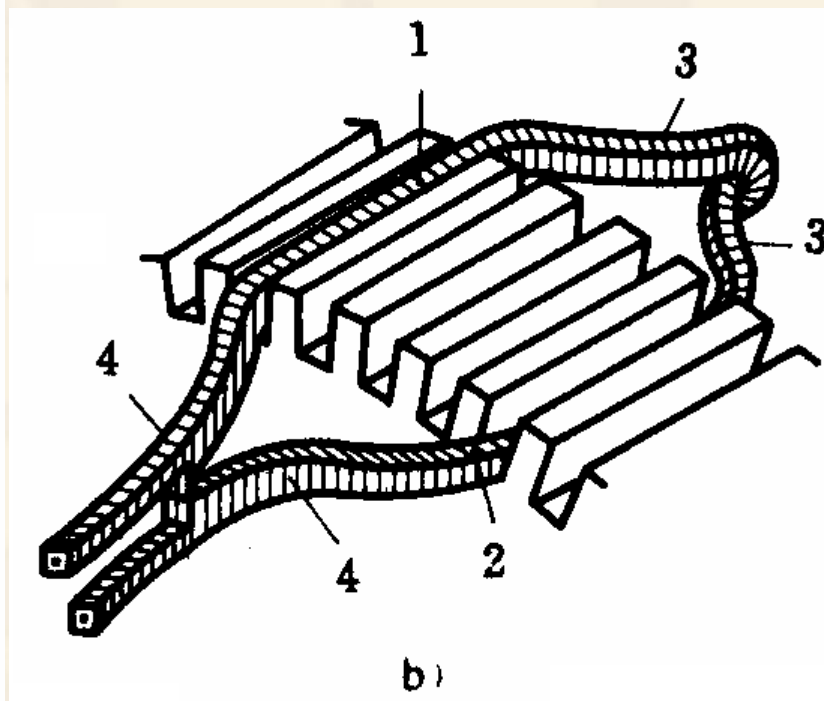
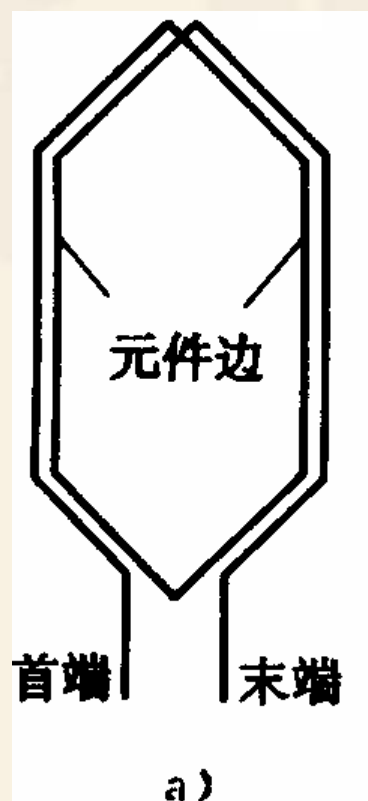
$$Z_i = uZ$$







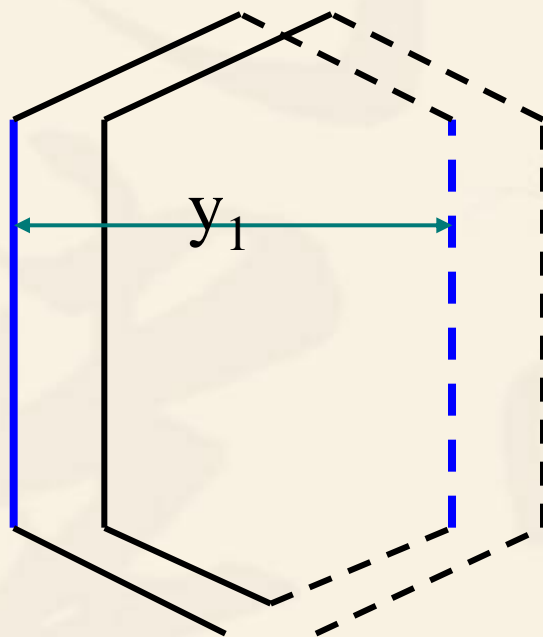
(7) **元件（线圈）**：是绕组的一个基本单元，可为单匝，也可为多匝，



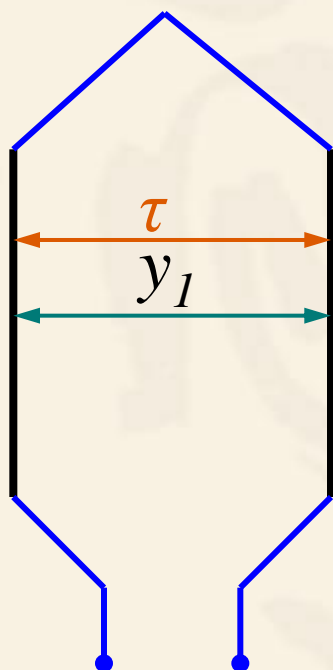
(8) 元件节距  $y_1$  (第一节距) : 元件两条边的距离, 以槽数计, 总是整数,

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon = \text{整数}$$

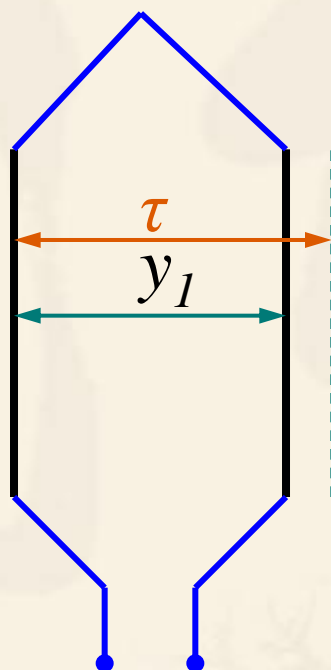
$\varepsilon$  : 是使凑成整数的分数。



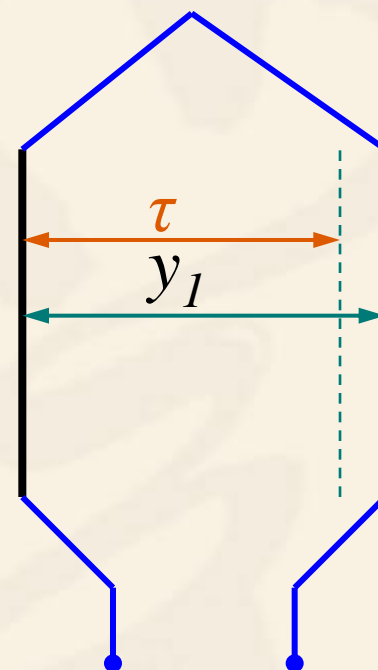
$y_1 = \tau$	整距绕组
$y_1 < \tau$	短距绕组
$y_1 > \tau$	长距绕组



$y_1 = \tau$   
整距线圈



$y_1 < \tau$   
短距线圈

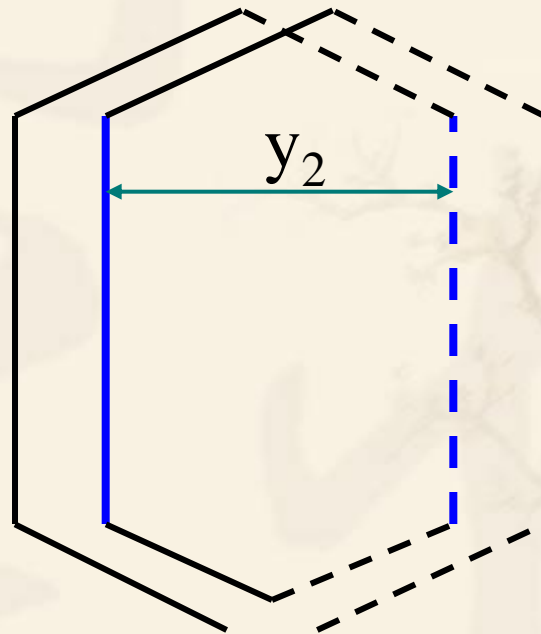


$y_1 > \tau$   
长距线圈

## (9) 第二节距 $y_2$

相串连的两个元件中,第一个元件的下层边与第二个元件的上层边在电枢表面上所跨的距离,称为第二节距。用 $y_2$ 表示,也用虚槽数计算。

**叠绕组为负，波绕组为正**





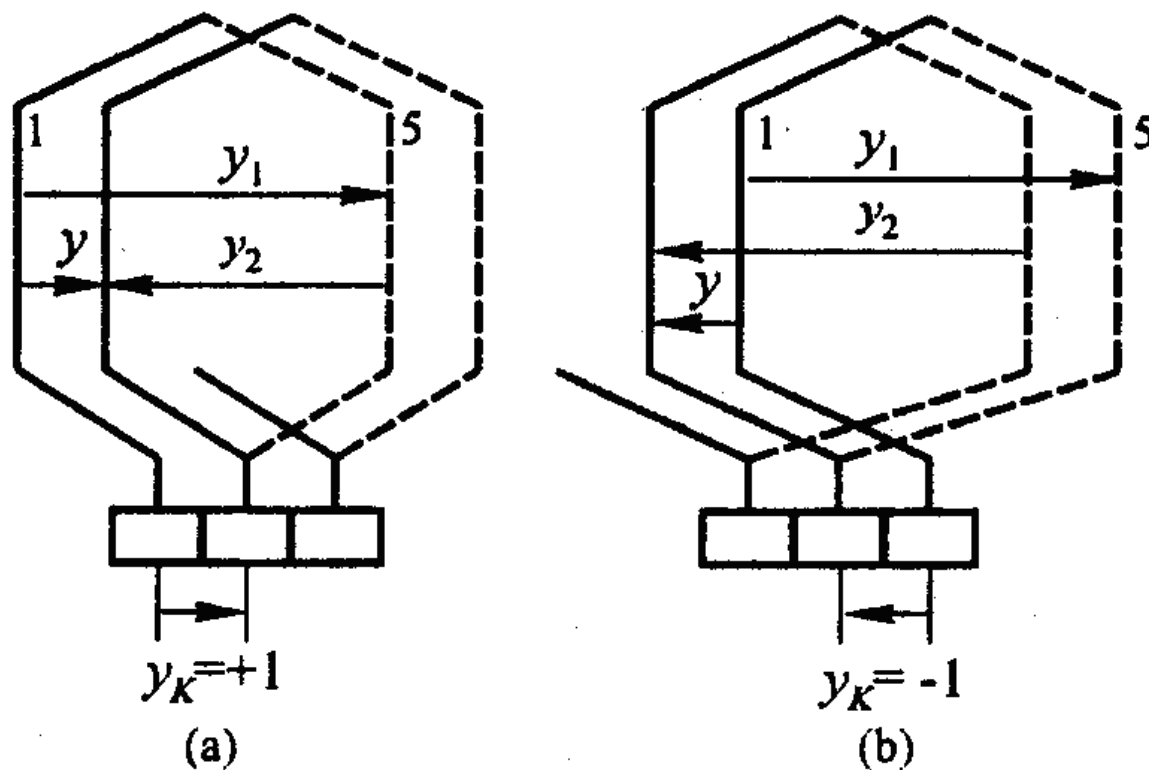


图 2.19 单叠绕组元件的联接情况

(a) 右行绕组 (b) 左行绕组

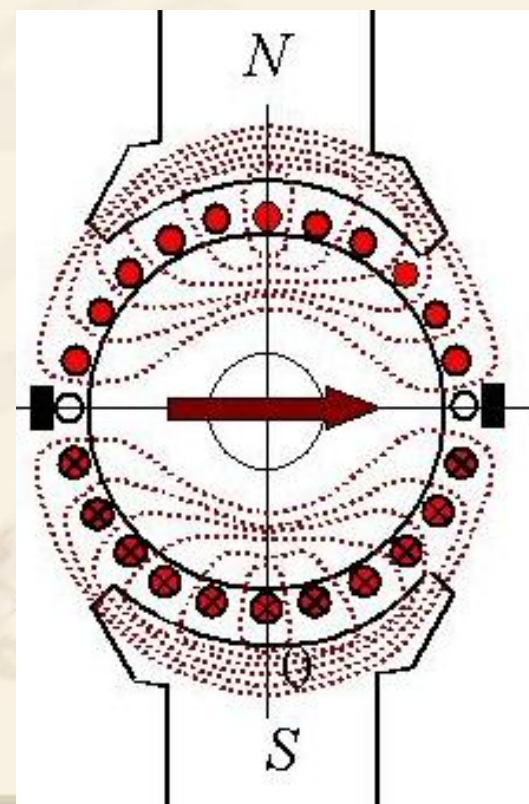
(10) 合成节距  $y$

(11) 换向器节距  $y_k = \pm 1$



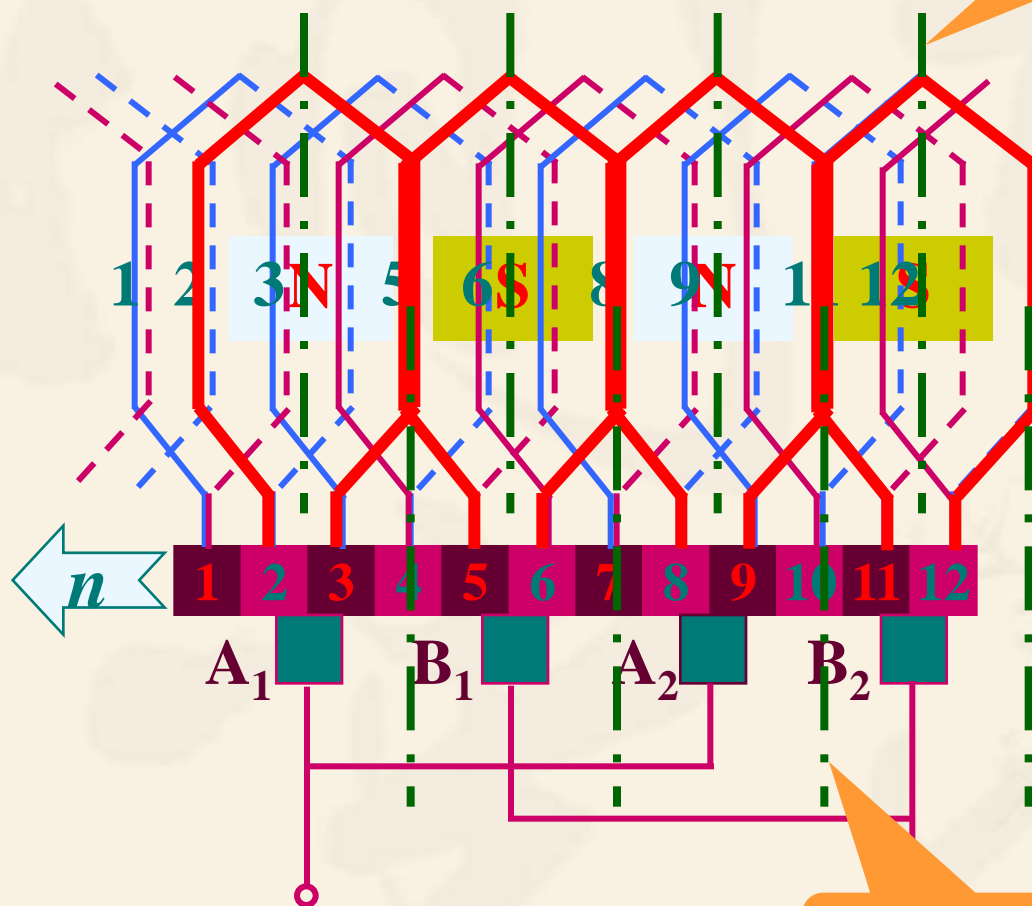
## 2 几个重要概念

- (1) 磁极轴线：磁极的中心线；
- (2) 几何中性线：磁极之间的平分线





## ● 单叠绕组的展开图



磁极中心线

元件数=换向片数

几何中心线



## 2.2.2 单叠绕组

元件依次相连，元件的出线端接到相邻的换向片上，第一个元件的下层边（虚线）连接着第二个元件的上层边，它放在第一元件上层边相邻的第二个槽内。下面通过例子说明单叠绕组如何连接，有何特点。

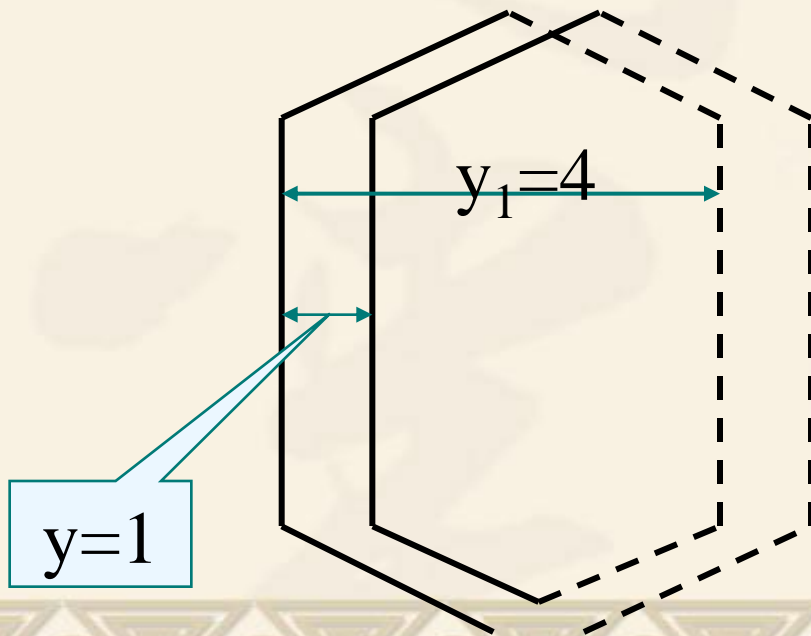
例:已知某直流电机的极对数  $p=2$  ,槽数 $Z$ ,件数 $S$ 及换向片数为 $Z=S=K=16$  ,试画出单叠绕组展开图。



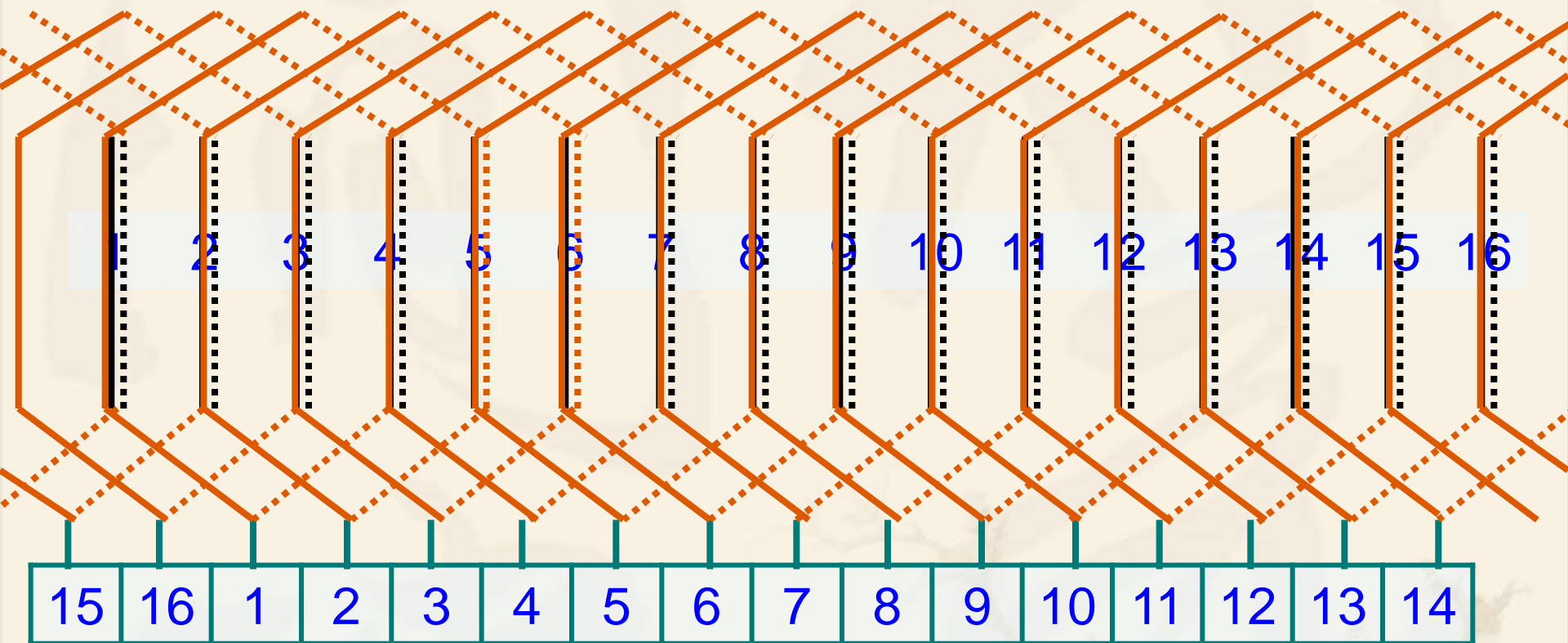
## 解：1. 计算绕组数据

$$y_1 = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{16}{2 \times 2} = 4$$

因为是单叠，所以  $y = y_k = 1$

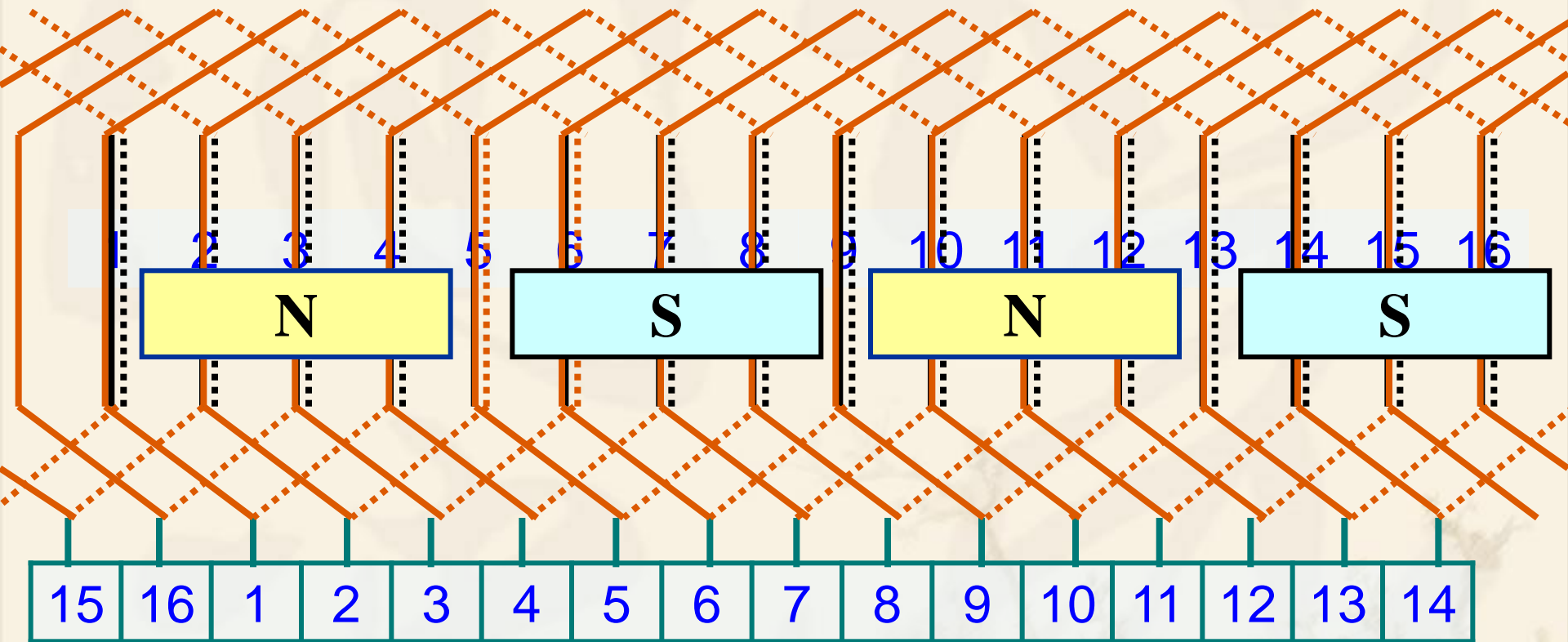


## 2. 画绕组展开图



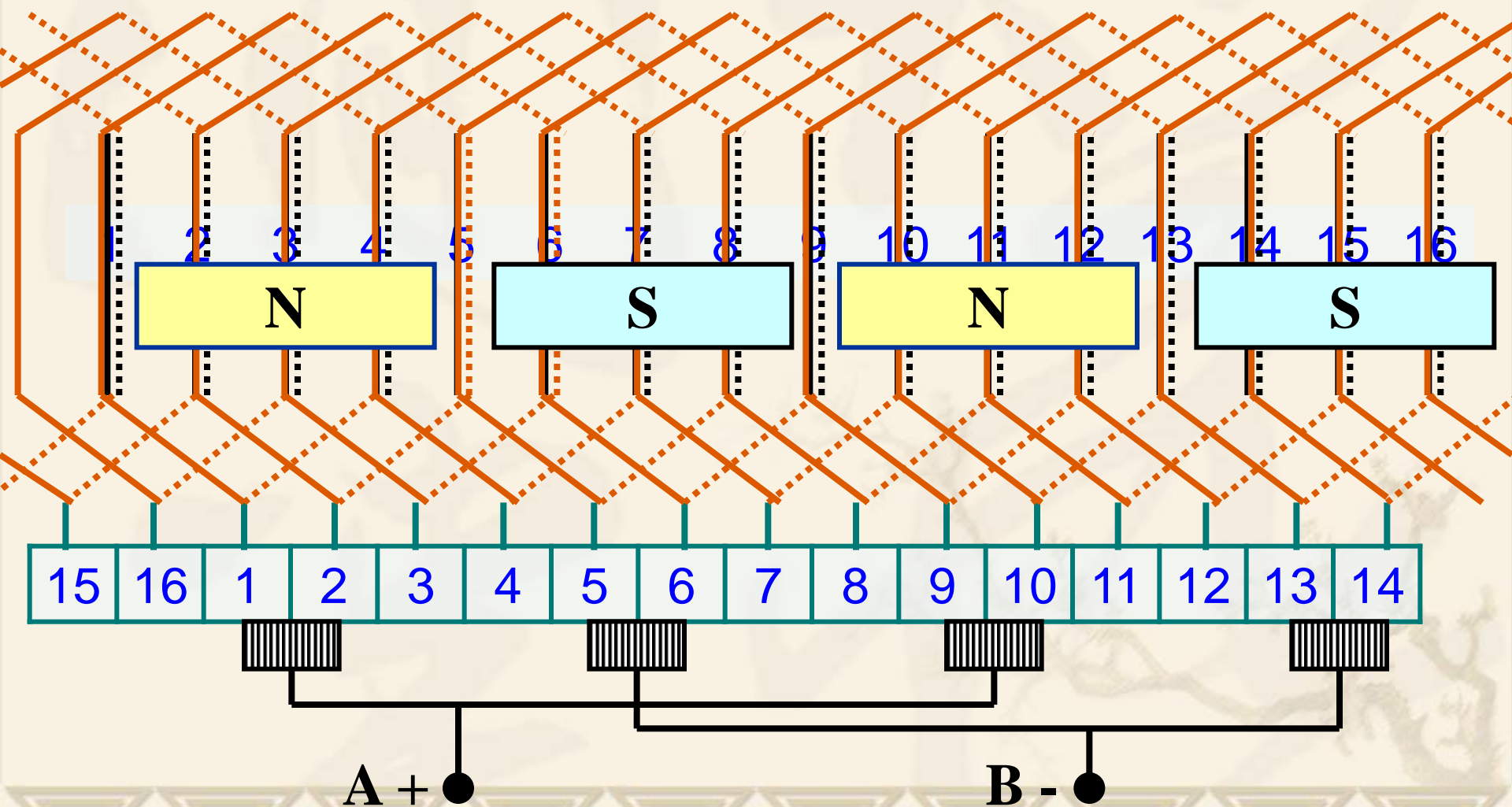
(3) 画出第二个元件，上层边在第2槽，与第一个元件的下层边联接；下层边在第6槽与3号换向联接。按此规律，一直把16个元件全部联起来。

(5) 放磁极：磁极宽度约为均匀分布在圆周上，N极磁力线垂直向里（进入纸面），S极向外（从纸面穿出）；



## (6) 电刷的放置:

在元件端接线对称的情况下，电刷的实际位置应在磁极中性线下，所以习惯上称为“电刷放在几何中性线位置”

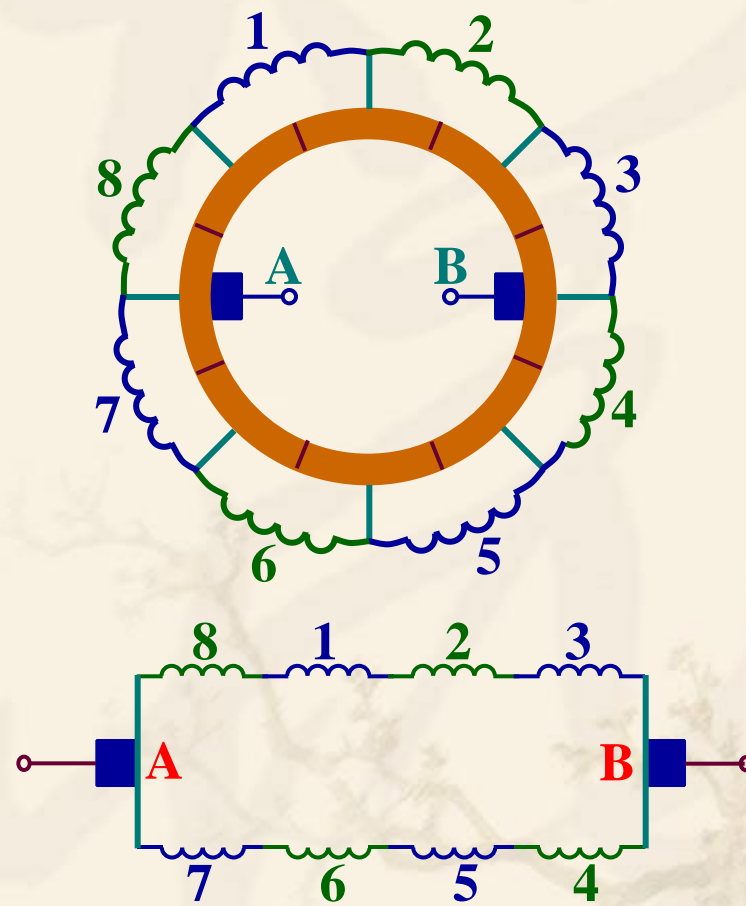
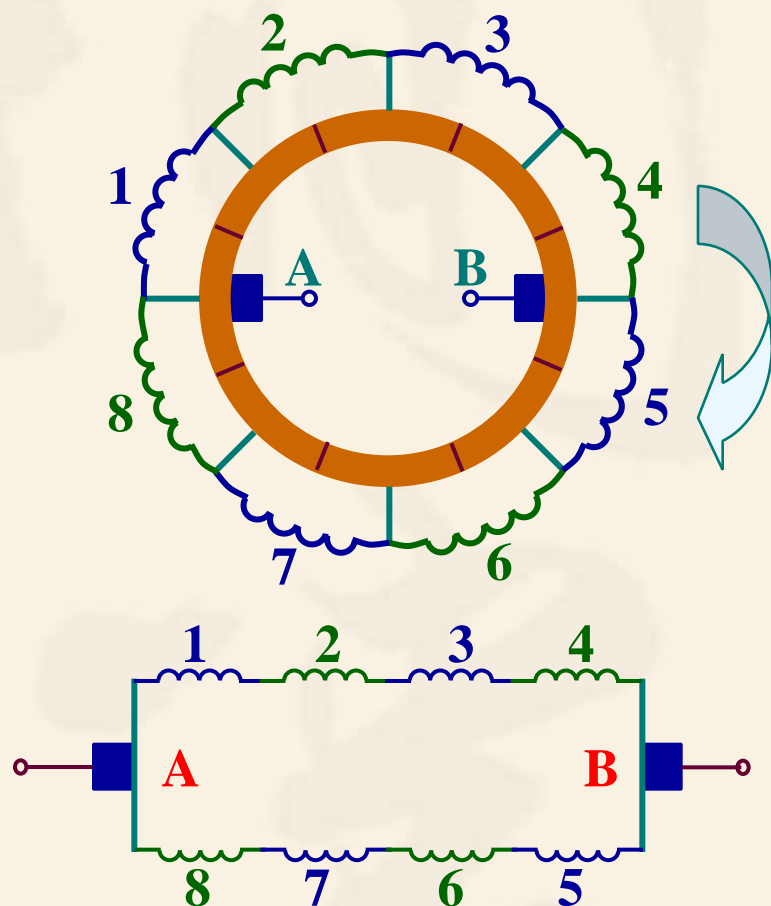






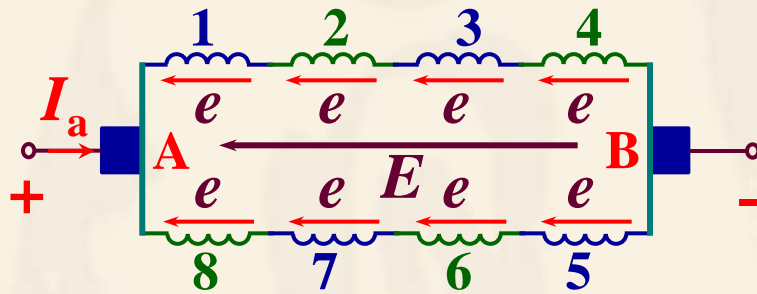
## 直流电枢绕组展开图

### ● 直流电枢绕组

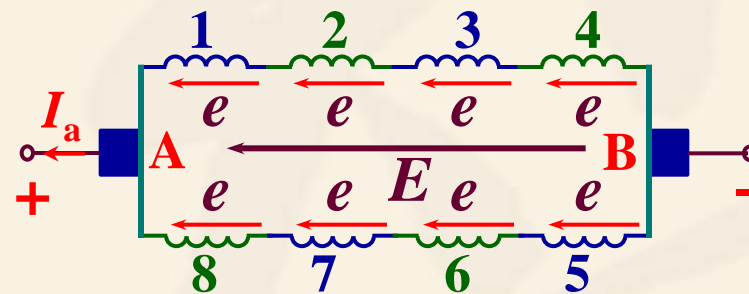


**结论：**整个电枢绕组通过换向片连成一个闭合回路。

# 直流电枢绕组

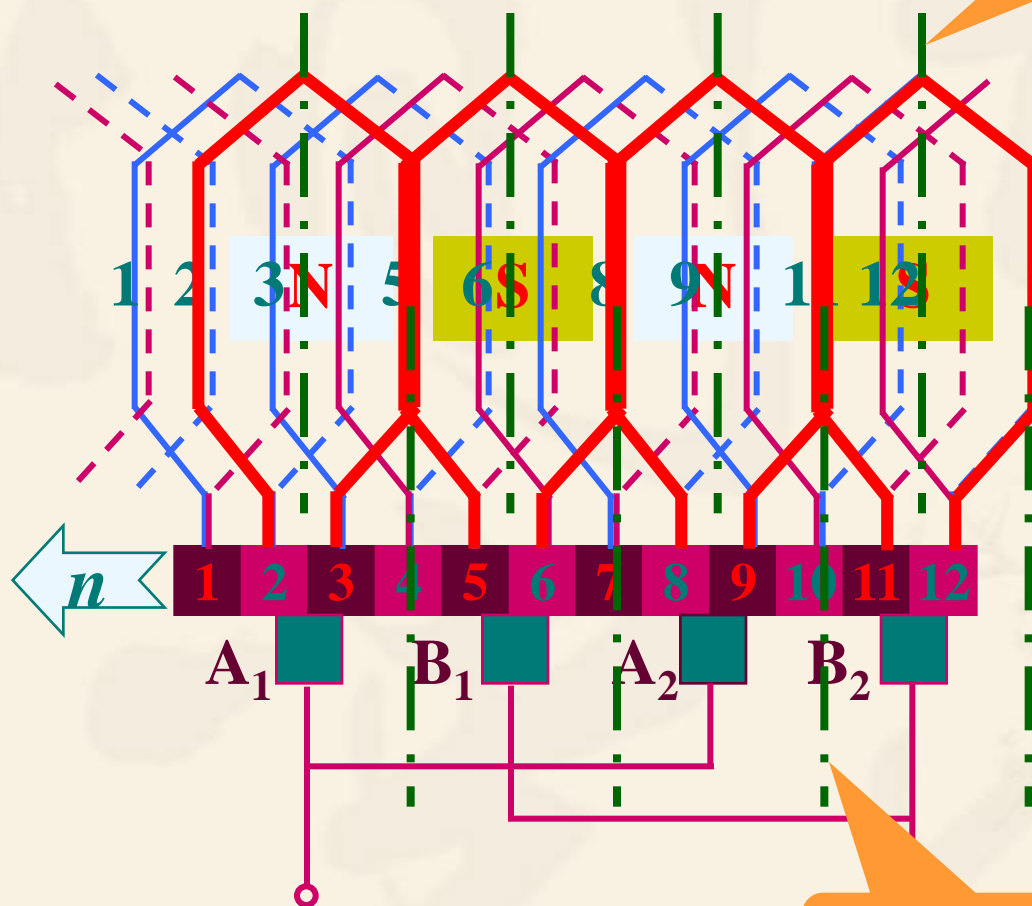


电动机



发电机

## ● 单叠绕组的展开图



磁极中心线

- ※ 电刷的中心线对着磁极的中心线：
- ① 电刷之间的电动势最大。
- ② 被电刷短接的元件电动势为零。
- ※ 习惯称“电刷放在几何中心线位置”。

几何中心线

### 3.单叠绕组电路图

为了进一步说明单叠绕组各个元件的联接次序及其电动势分布情况，按图将各元件的联接顺序，可得到如图所示的绕组电路图。

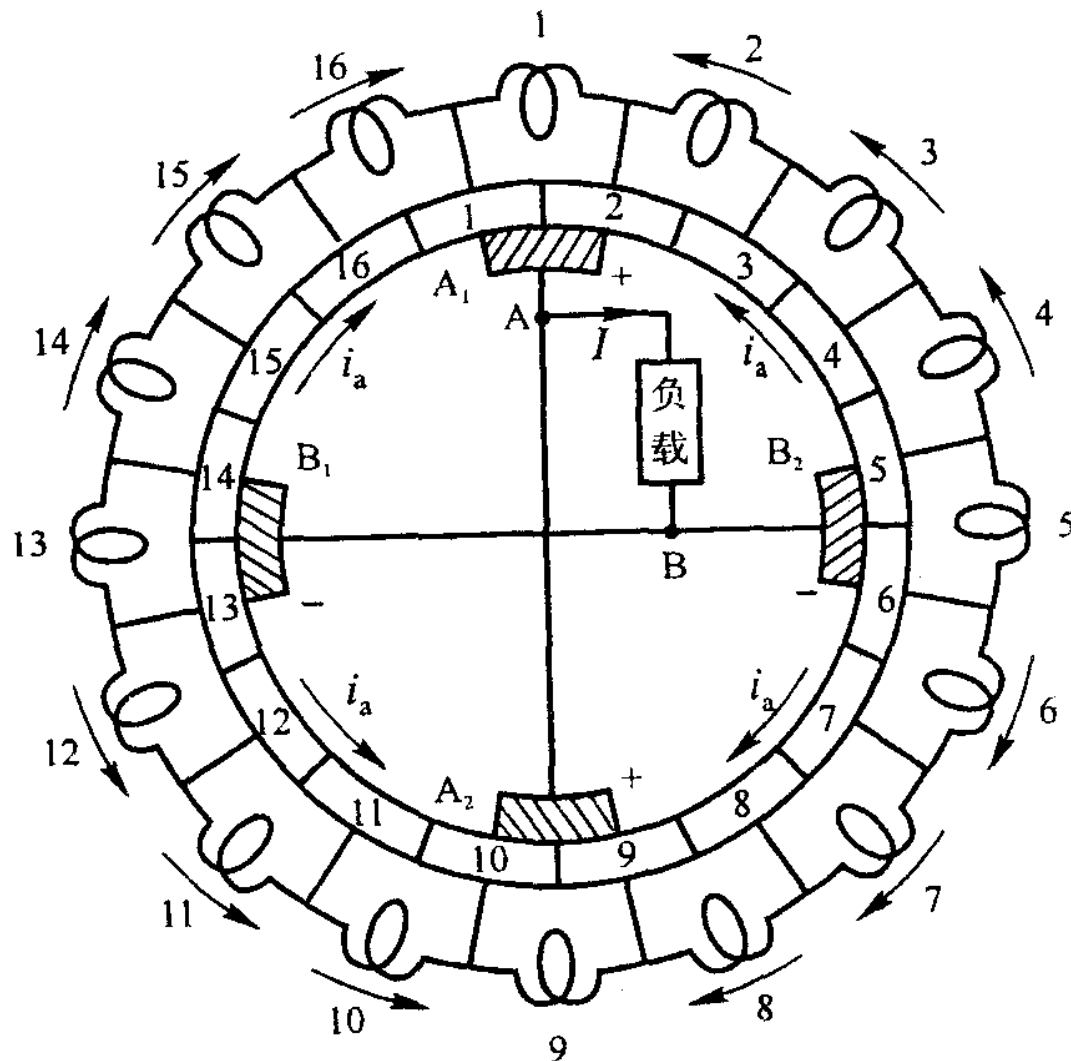


图 2.21 单叠绕组的电路图



## 单叠绕组的特点

- a) 元件的两个出线端联接于相邻两个换向片上；
- b) 并联支路数等于磁极数， $2a=2p$ ；
- c) 整个电枢绕组的闭合回路中，感应电动势的总和为零，绕组内部无“环流”；
- d) 每条支路由不相同的电刷引出，所以电刷不能少，电刷数等于磁极数；
- e) 电刷间引出的电势为每一支路电势，正、负电刷间引出的电流为各支路电流之和。



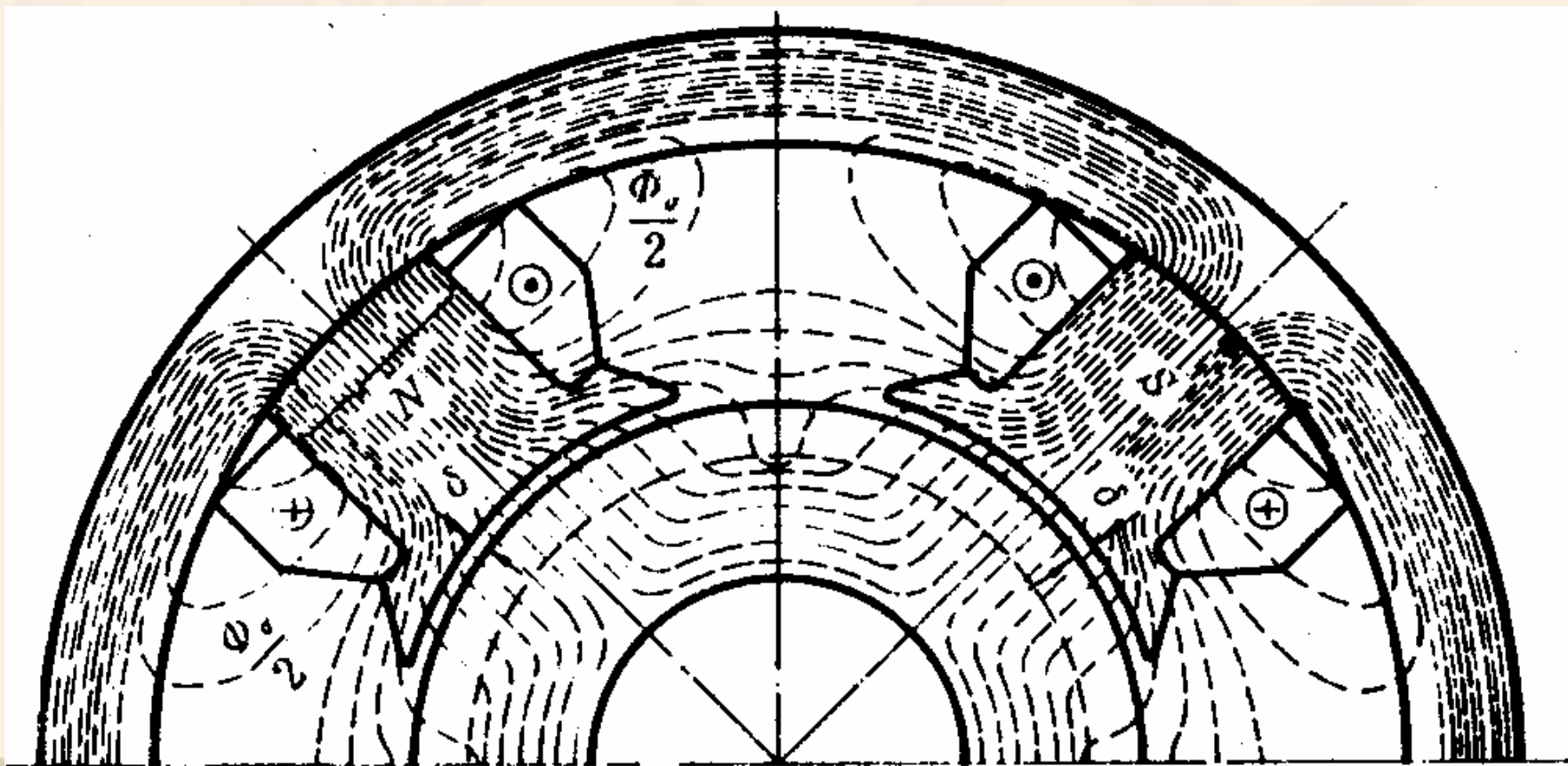
## 2.3 直流电机的磁场

**空载：**发电机出线端没有电流输出，电动机轴上不带机械负载，**即电枢电流为零的状态**。那么，这时的气隙磁场，只由主极的励磁电流所建立，所以直流电机空载时的气隙磁场，又称励磁磁场。

**主磁通：**经过主磁极、气隙、电枢铁心及机座构成磁回路。它同时与励磁绕组及电枢绕组交链，能在电枢绕组中感应电动势和产生电磁转矩，称为主磁通 $\Phi_0$ 。



**漏磁通：**仅交链励磁绕组本身，不进入电枢铁心，不和电枢绕组相交链，不能在电枢绕组中感应电动势及产生电磁转矩，称为漏磁通 $\Phi_{\sigma}$ 。





## 空载时每极主磁通

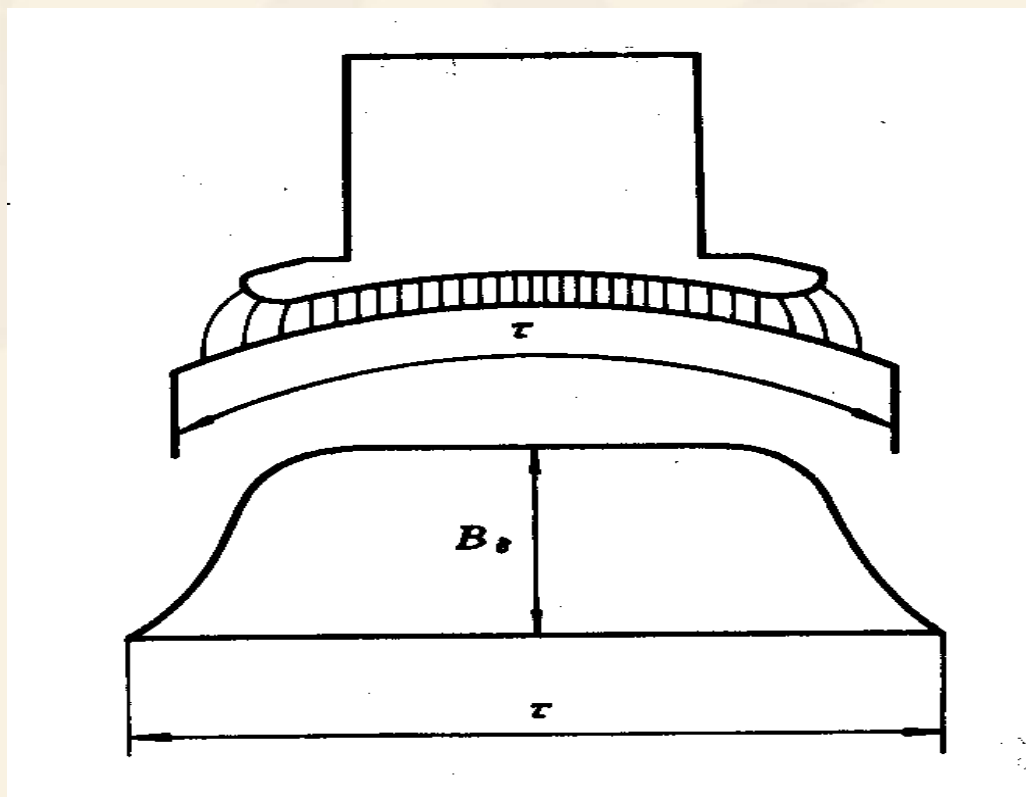
设电枢圆周为  $x$  轴而磁极轴线处为纵轴，又设电枢长度为  $l$ ，则离开坐标原点为  $x$  的  $dx$  范围内的气隙主磁通为：

$$d\Phi_x = B_x l dx$$

则：  $\Phi_0 = \int d\Phi_x$

$$= \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} B_x l dx$$

$$= l \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} B_x dx$$

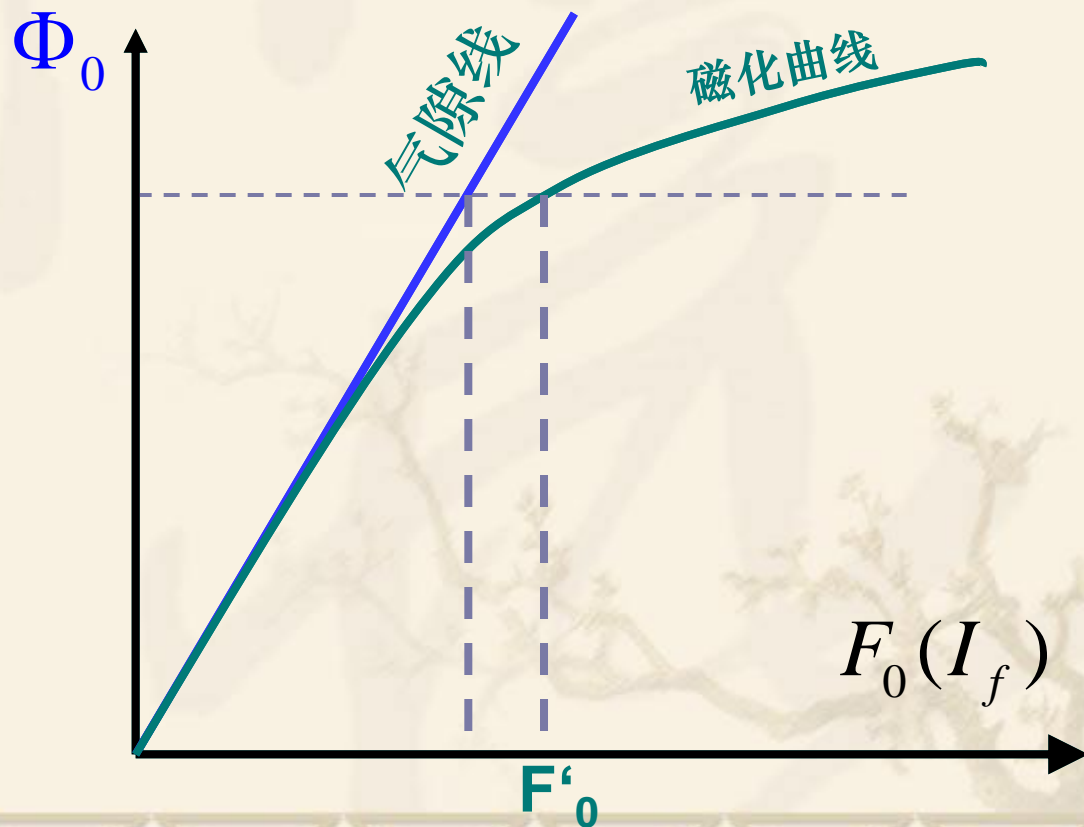






空载时的每极磁通是随磁动势或励磁电流的变化而变化。  
电机的磁化曲线：

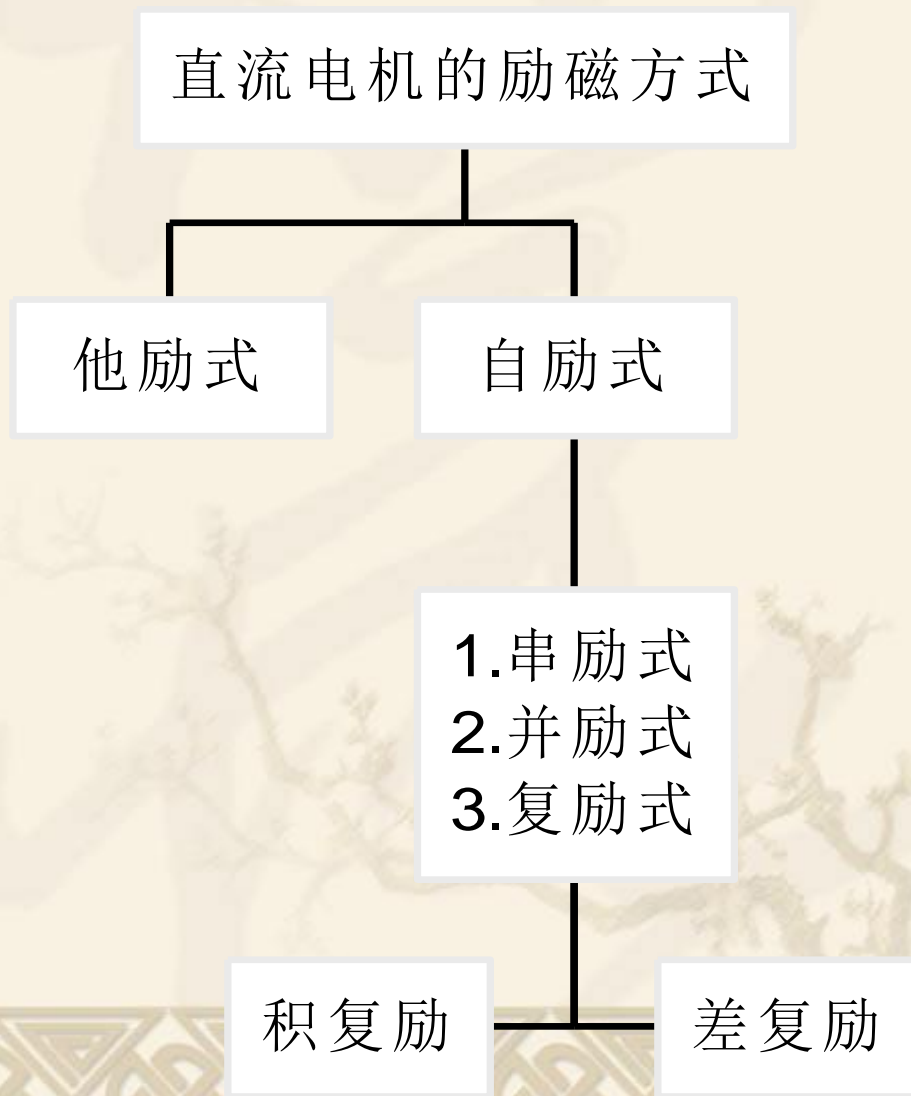
在额定状态下，电机往往工作在饱和点附近，这样即可以获得较大的磁通，又不致需要太大的励磁磁动势，从而可以节省铁心和励磁绕组的材料。





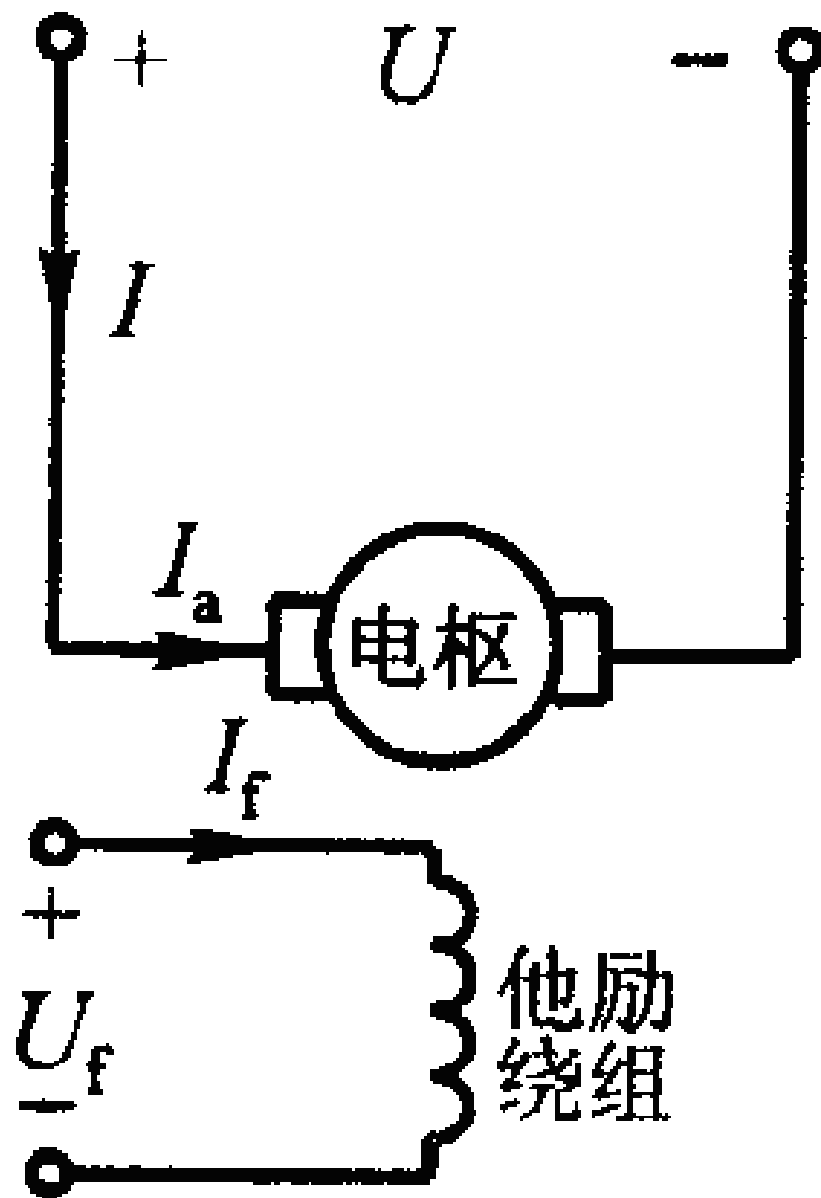
## 2.3.1 直流电机的励磁方式

分类



# 1.他励

励磁电流由其他直流电源单独供给，励磁绕组和电枢绕组相互独立。



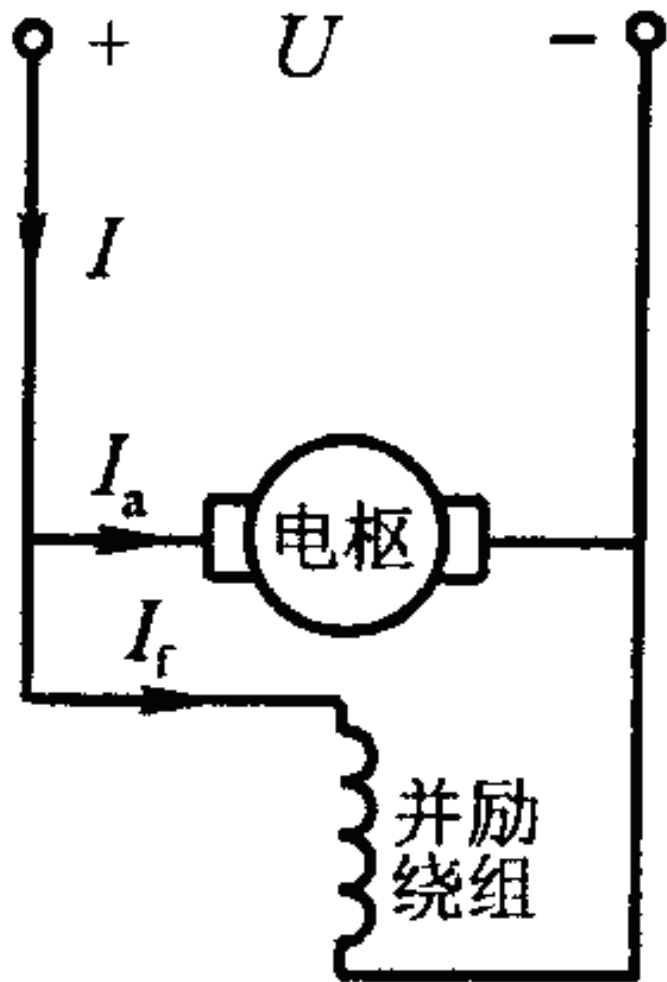
自励式：顾名思义，励磁电流由电机自身供给。而根据自励方式即电枢绕组和励磁绕组的连接方式的不同，自励式又分为串励式、并励式和复励式：

## 2 并励式

电枢绕组和励磁绕组相并联，满足

$$U_f = U_a$$

$$I = I_a + I_f$$

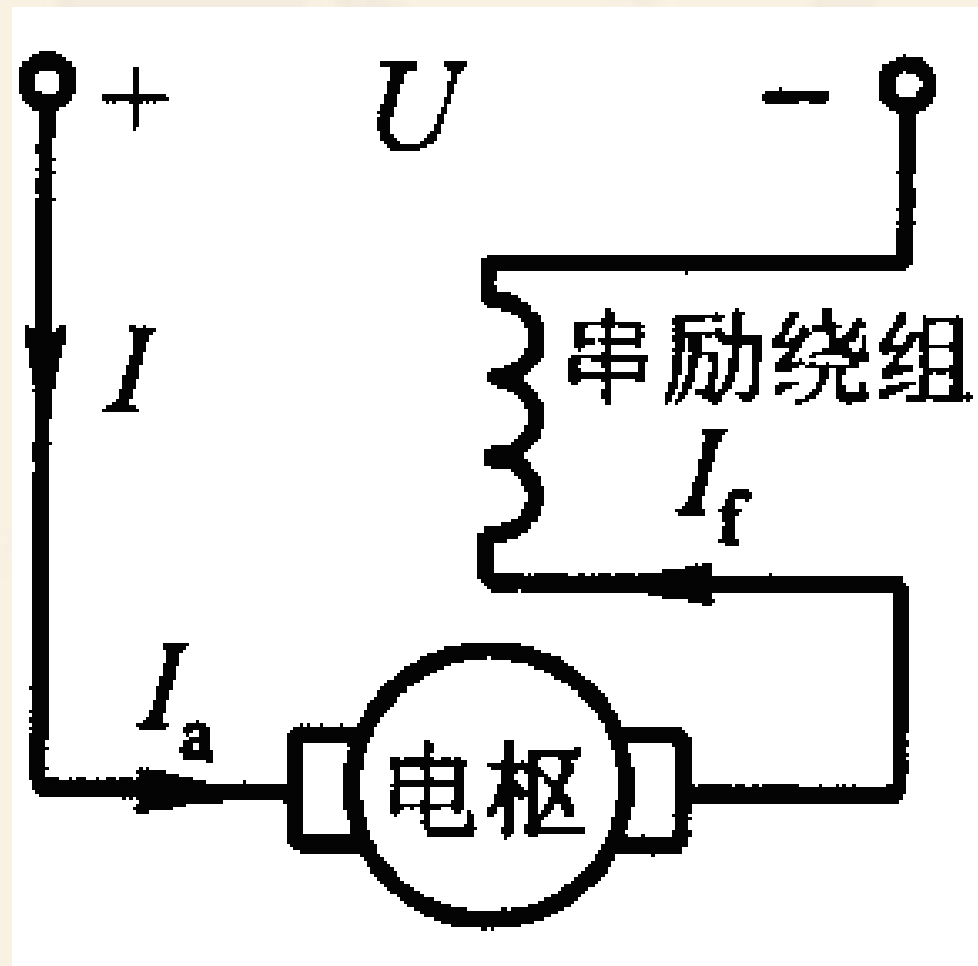




### 3 串励

电枢绕组和励磁绕组  
相串联，满足：

$$I = I_a = I_f$$





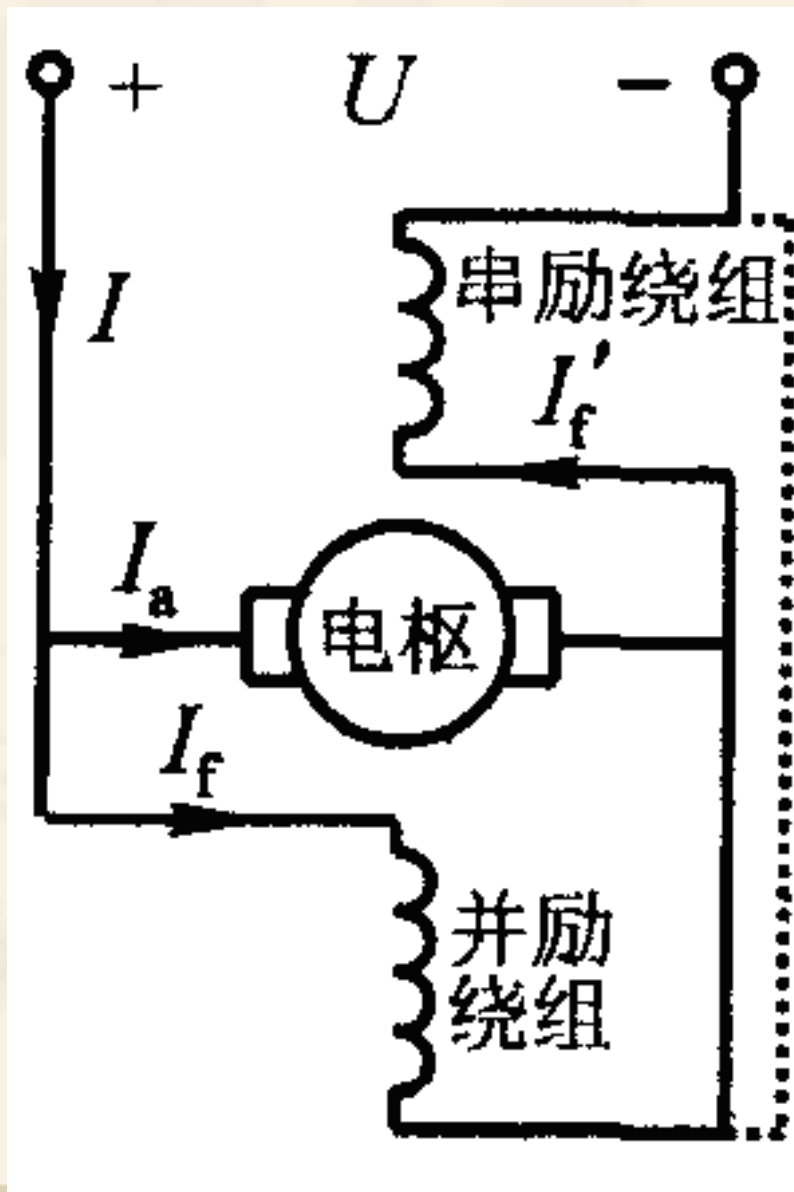
## 4 复励式：

在整个励磁回路中，有两套励磁绕组，一套和电枢绕组相并联，一套和电枢绕组相串联，根据两个励磁绕组所产生的磁动势的关系，又可分为积复励和差复励：

积复励：串励绕组和并励绕组所产生的磁动势方向一致，互相叠加， $\sum F = F_S + F_f$

反之，叫做差复励：

$$\sum F = F_f - F_S$$





## 1. 转子（又称电枢）

由铁芯、绕组（线圈）、换向器组成。

## 2. 定子

定子的分类：

- 永磁式：由永久磁铁做成。
- 励磁式：磁极上绕线圈，然后在线圈中通过直流电，形成电磁铁。

**励磁的定义：**磁极上的线圈通以直流电产生磁通，称为励磁。

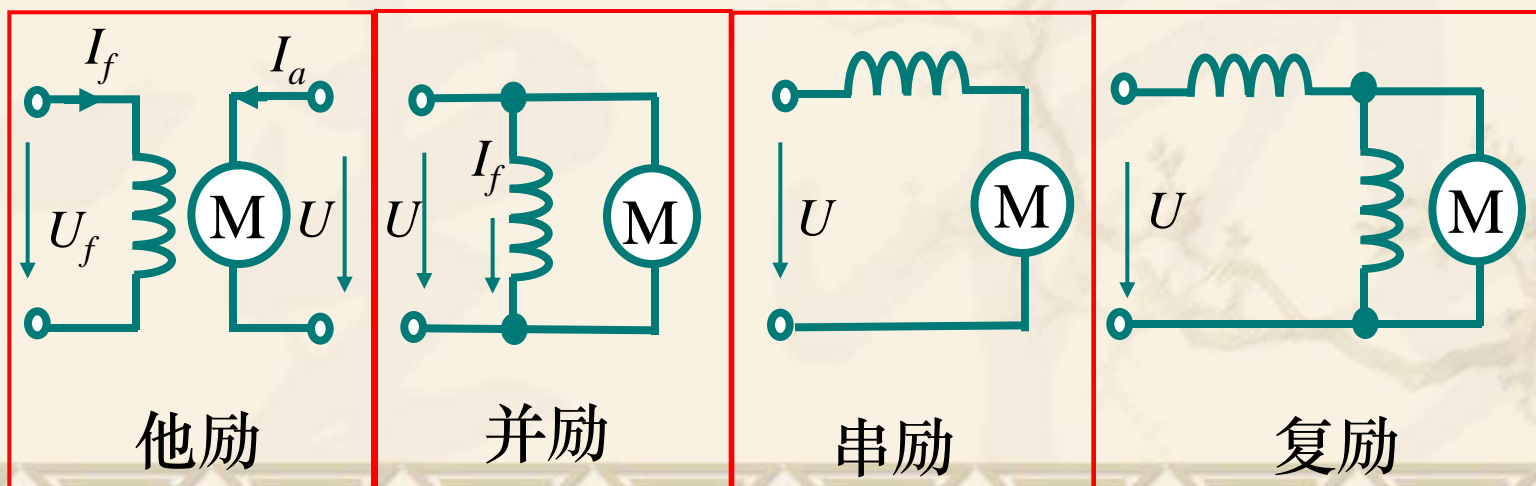
根据励磁线圈和转子绕组的联接关系，励磁式的直流电机又可细分为：

**他励电动机：**励磁线圈与转子电枢的电源分开。

**并励电动机：**励磁线圈与转子电枢并联到同一电源上。

**串励电动机：**励磁线圈与转子电枢串联接到同一电源上。

**复励电动机：**励磁线圈与转子电枢的联接有串有并，接在同一电源上。







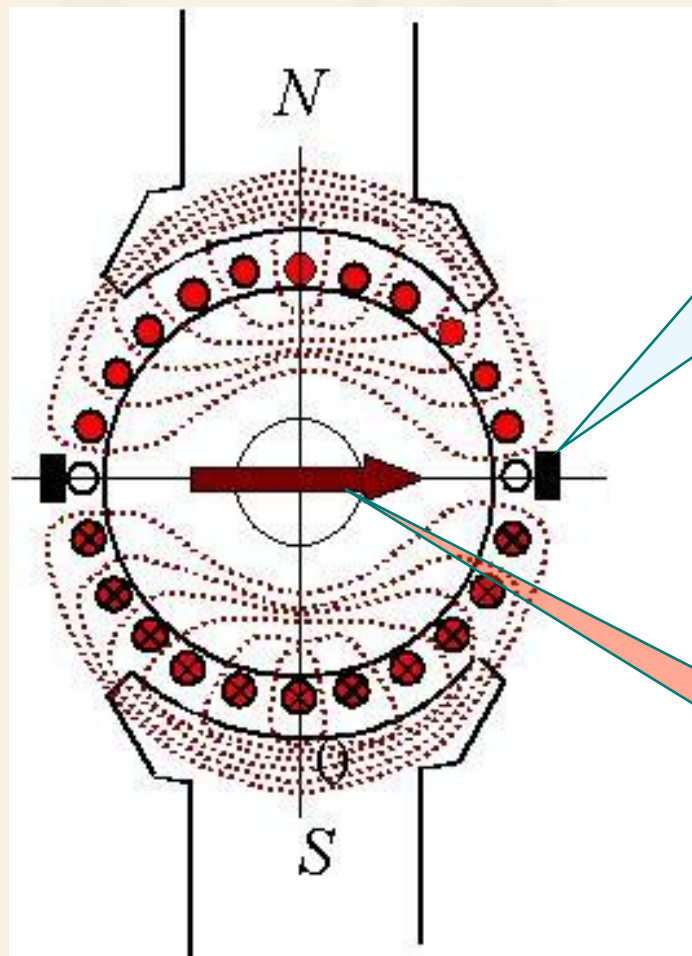
### 2.3.3 直流电机的电枢磁场

显然，由于电枢磁动势的出现，气隙磁场将会发生变化。

**电枢反应：**电枢磁动势对主极气隙磁场的影响称为电枢反应。

而电枢反应的性质又根据其反应方向的不同，分为交轴电枢反应和直轴电枢反应，下面我们就来具体的看一下他们二者对我们的气隙磁场的分部到底会有怎样的影响，而这个影响又和电刷在电机上位置的摆放密切相关：

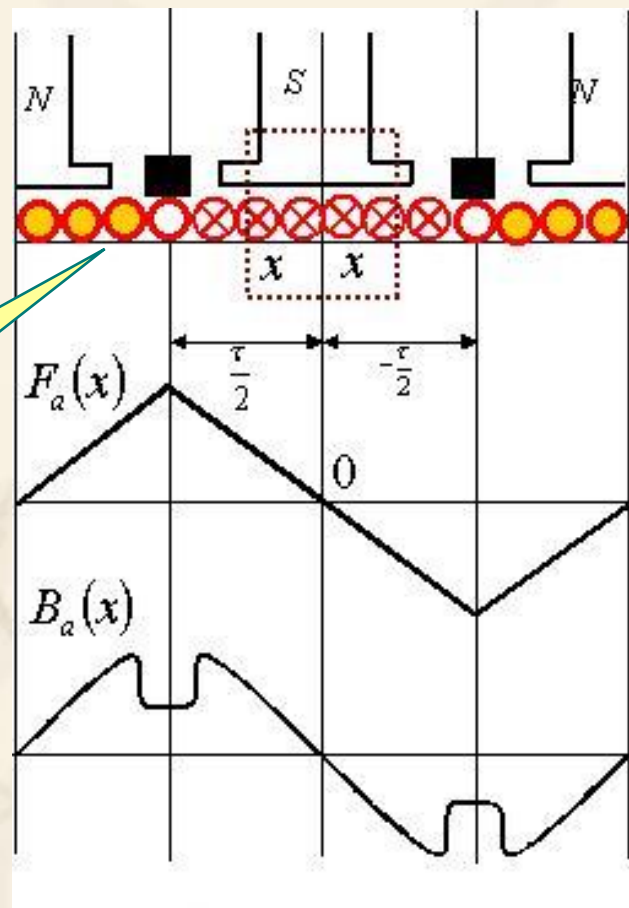
# 一、电刷在几何中性线上



省去换向器，电流的换向在电刷处

沿电枢表面展开

交轴电枢磁动势





设主极中心取为原点O，取一经过距原点 $+x$ 及 $-x$ 的闭合回路，设 $Z_a$ 为电枢绕组总导体数， $D$ 为电枢直径，根据安培环路定律，此回路所含的安培导体数为：

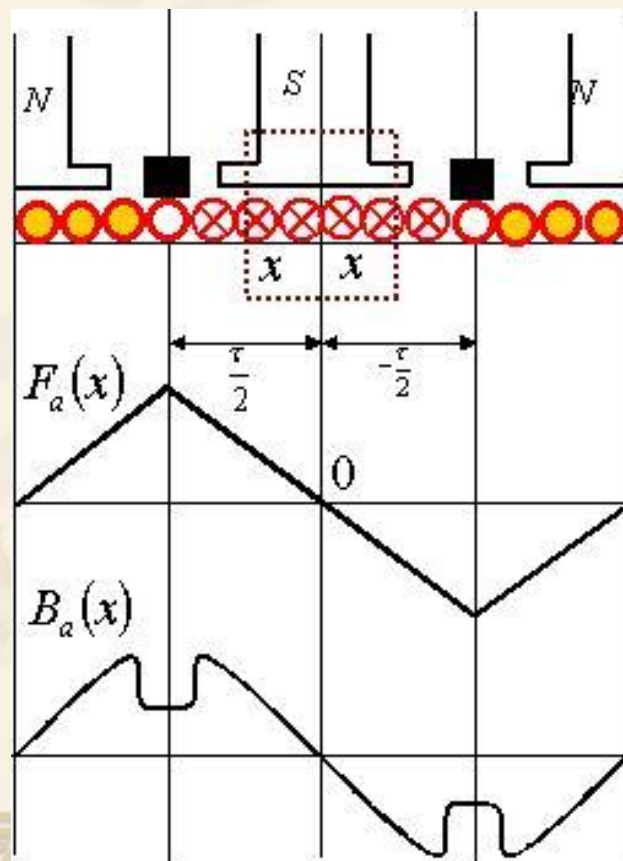
$$\frac{2xZ_a i_a}{\pi D}$$

在 $x$ 处气隙的磁势为

$$f_a(x) = \frac{1}{2} \left( \frac{2xZ_a i_a}{\pi D} \right) = Ax$$

$$-\frac{\tau}{2} \leq x \leq \frac{\tau}{2}$$

$$A = \frac{Z_a i_a}{\pi D}$$





A为电枢表面单位长度上的安培导体数称为线负荷。

$$A = \frac{Z_a i_a}{\pi D}$$

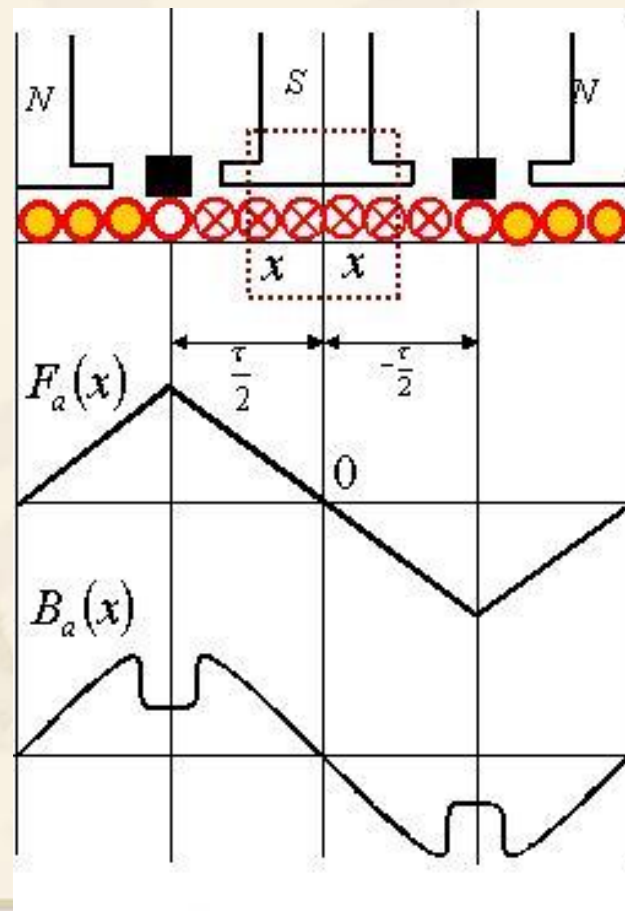
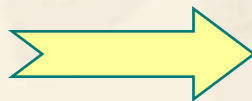
在几何中性线处，即  $x = \frac{\tau}{2}$  处，

交轴电枢磁势达到最大值

$$F_{aq} = A \frac{\tau}{2}$$

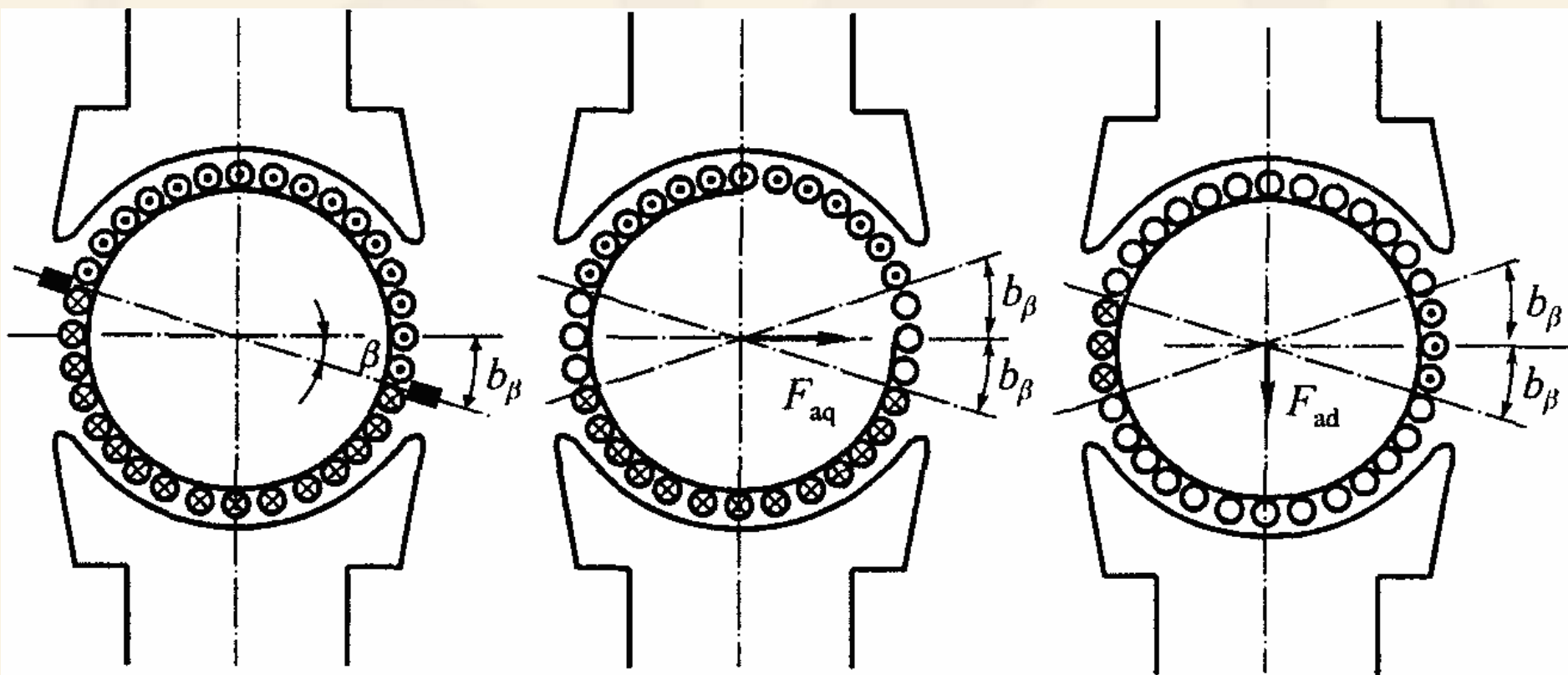
磁密的空间分布式：

$$\begin{aligned} B_a(x) &= \mu_0 H_a(x) \\ &= \mu_0 \frac{F_a(x)}{\delta(x)} = \mu_0 \frac{Ax}{\delta(x)} \end{aligned}$$





## 二、电刷不在几何中性线上的电枢磁动势



(a) 电枢磁动势

(b) 交轴分量

(c) 直轴分量

电刷偏离几何中性线的电枢磁场

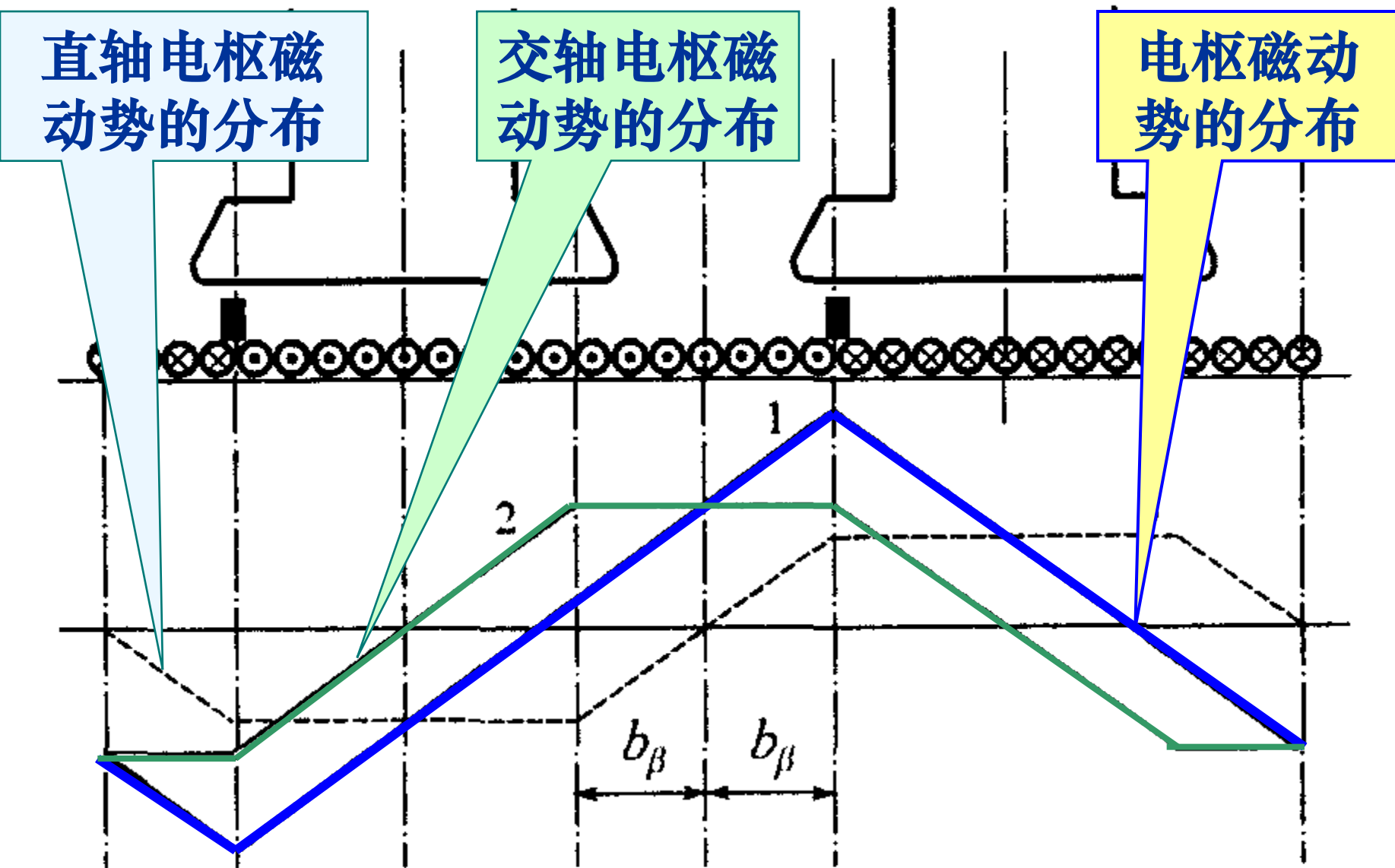


图 2.35 电刷偏离几何中性线上时电枢磁动势分布

## 2.3.4 电枢反应

负载时电枢磁动势对主极磁场的影响称为电枢反应。如果电枢磁动势有交轴和直轴分量，则电枢反应就相应的称为交轴电枢反应或直轴电枢反应。

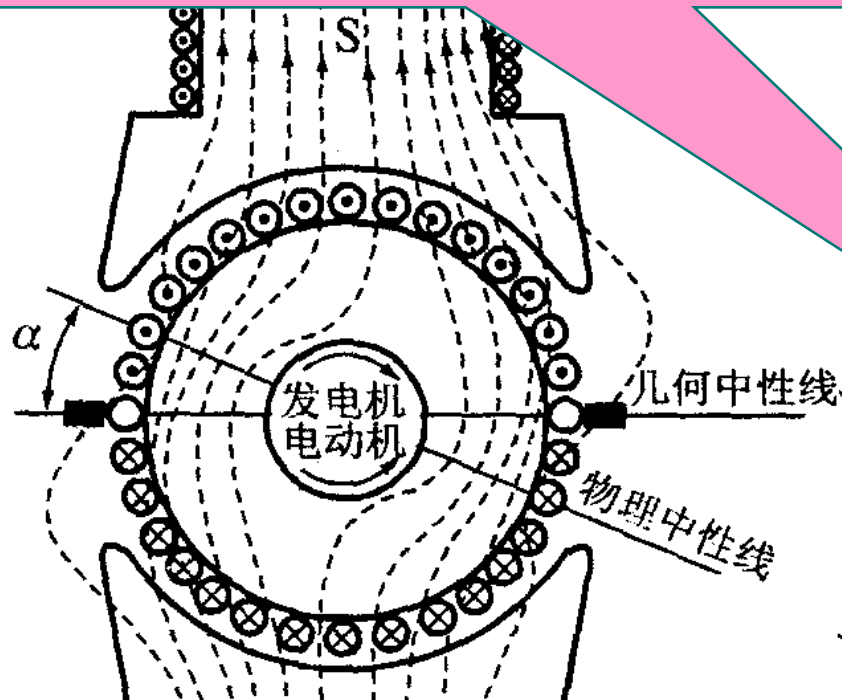
### 1. 交轴电枢反应

电枢磁密的空间分布式：

$$\begin{aligned} B_a(x) &= \mu_0 H_a(x) \\ &= \mu_0 \frac{F_a(x)}{\delta(x)} = \mu_0 \frac{Ax}{\delta(x)} \end{aligned}$$

交轴电枢磁场在半个极内对主极磁场起去磁作用，在另半个极内则起增磁作用，引起气隙磁场畸变

使电枢表面磁通密度等于零的位置偏移几何中性线，新的等于零的我们称之为物理中性线



不计饱和，交轴电枢反应即无增磁，亦无去磁作用。

考虑饱和时，起到去磁作用

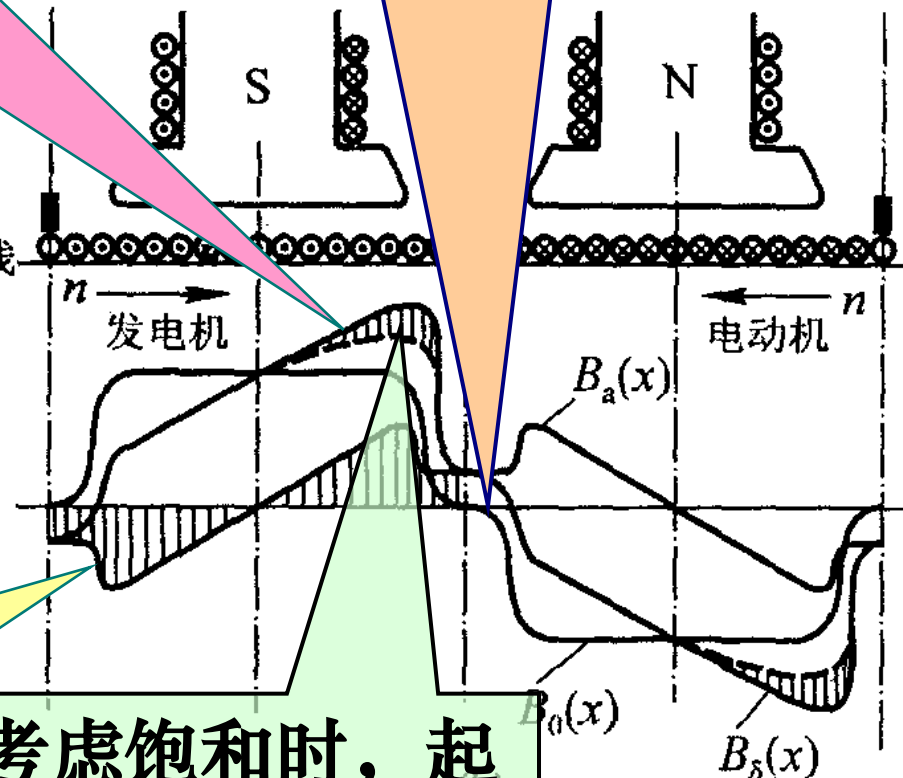


图 2.36

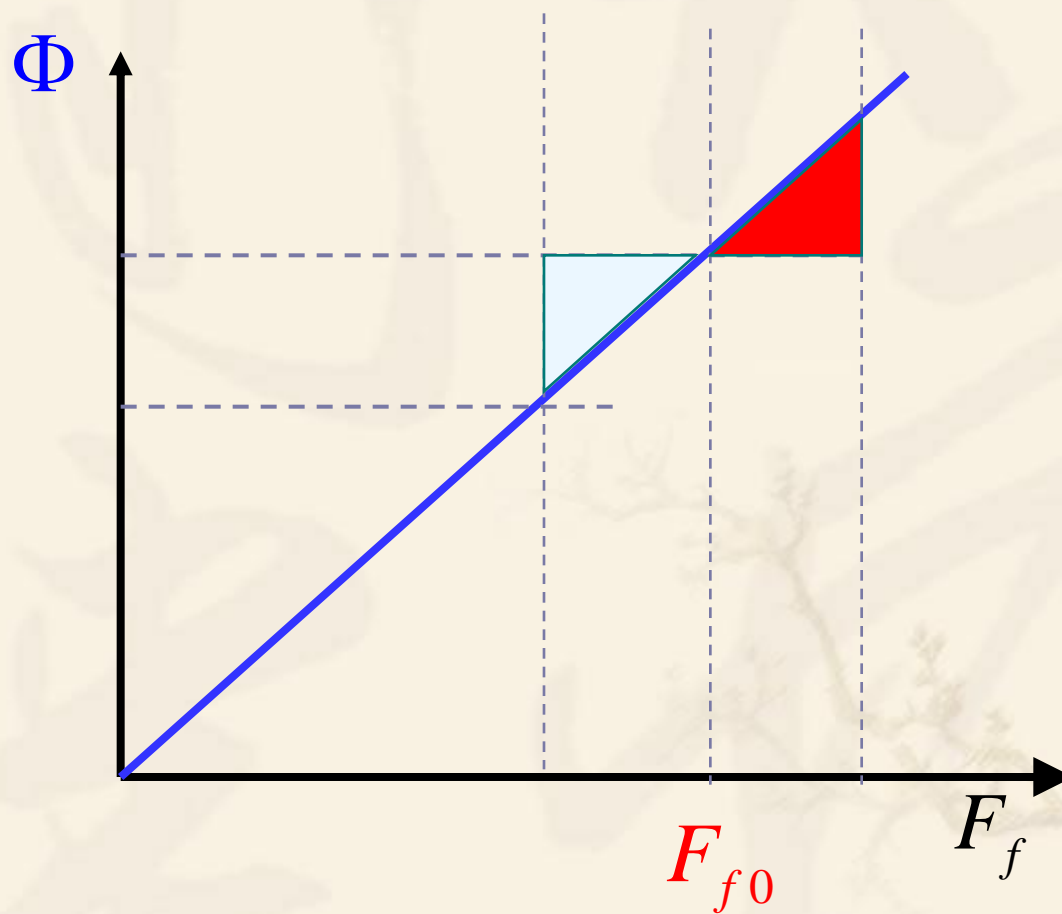
交轴电枢反应

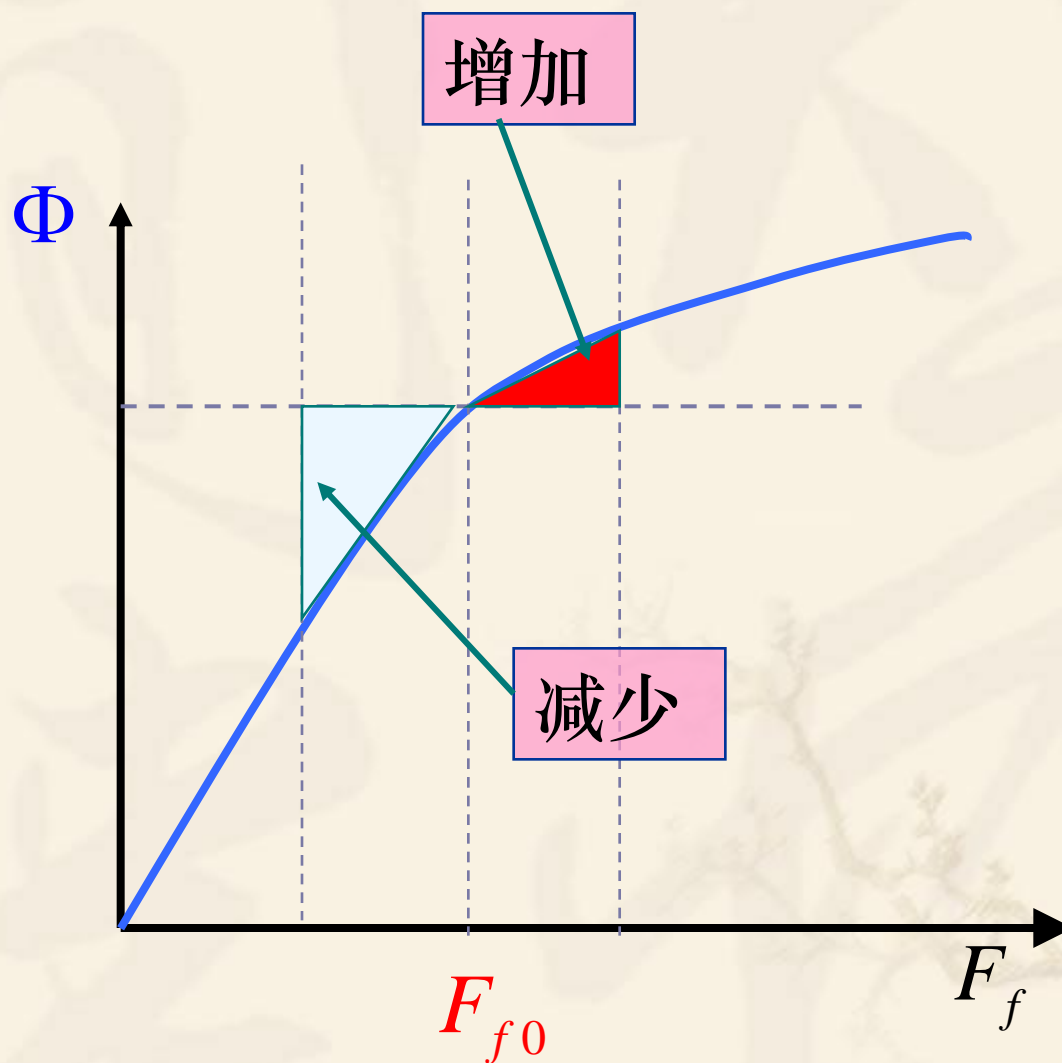




## 交轴电枢反应性质

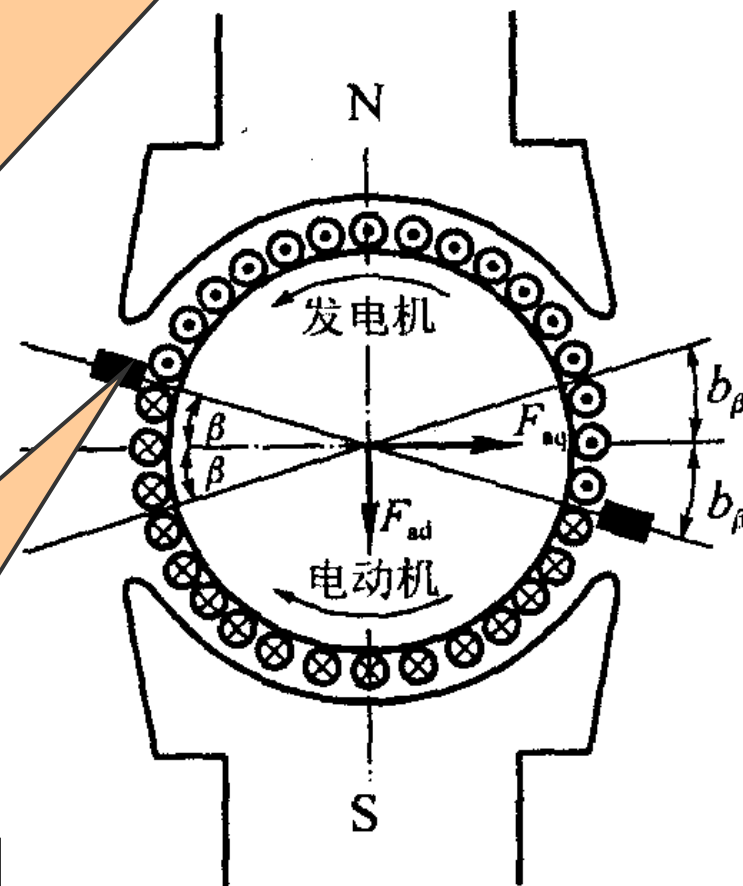
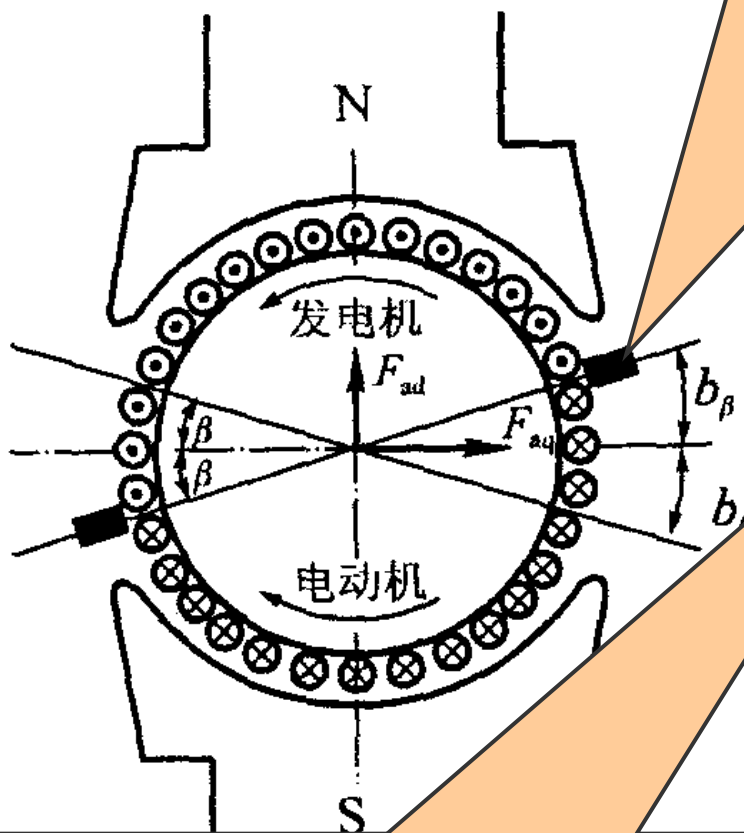
- a) 交轴电枢磁场在半个极内对主极磁场起去磁作用，在另半个极内则起增磁作用，引起气隙磁场畸变，使电枢表面磁通密度等于零的位置偏移几何中性线，新的等于零的我们称之为物理中性线。
- b) 不计饱和，交轴电枢反应即无增磁，亦无去磁作用。考虑饱和时，起到去磁作用。





## 2. 直轴电枢反应

发电机，电刷**顺**着旋转的方向移动一个夹角，对主极磁场而言，直轴起**去磁**反应



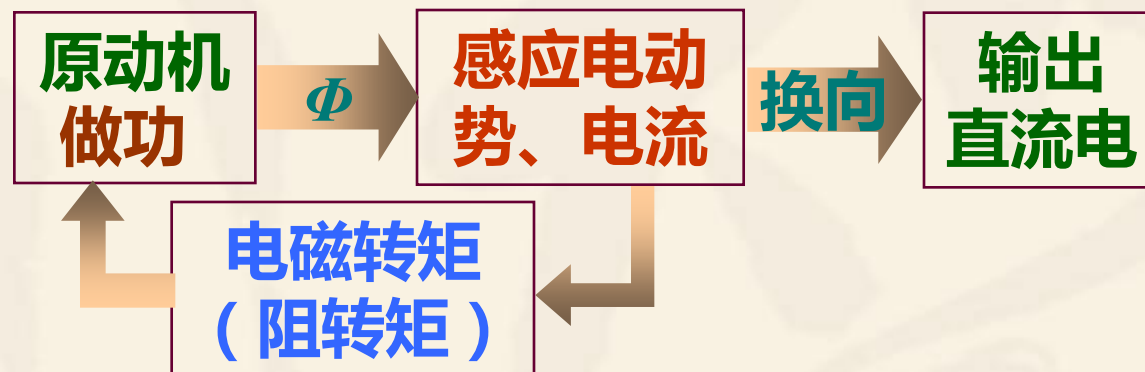
(b)

发电机，电刷**逆**着旋转的方向移动一个夹角，对主极磁场而言，直轴起**助磁**反应

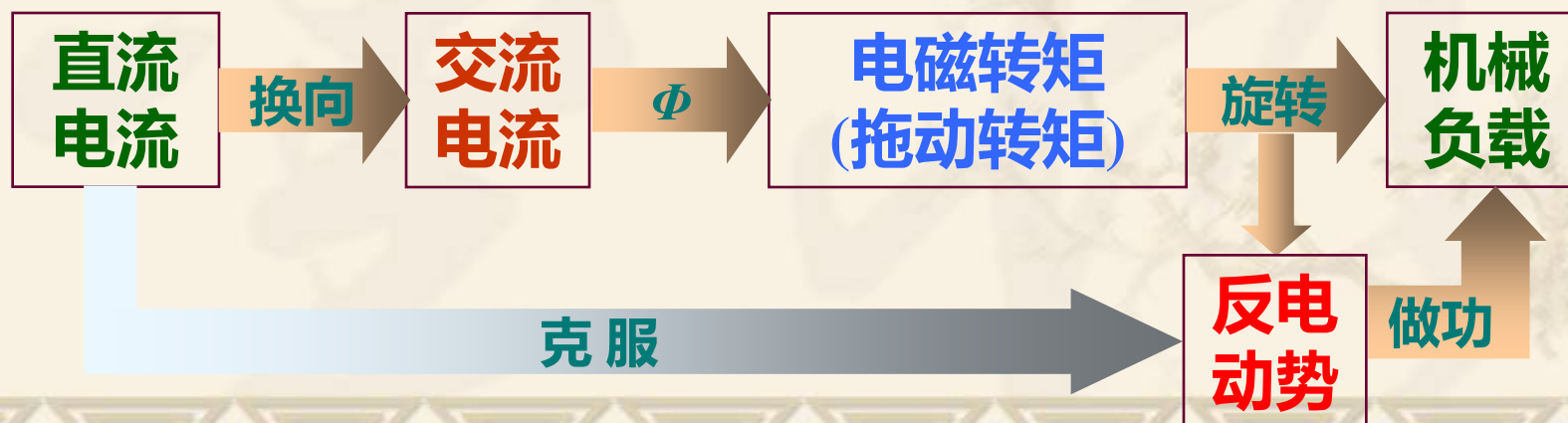
何中性线的电枢反应



## ● 发电机



## ● 电动机电磁关系



## 2.3.5 感应电动势和电磁转矩

### 电枢电动势

电枢电动势是指直流电机正负电刷之间的感应电动势，也就是电枢绕组里每条并联支路的感应电动势。所以，我们可以先求一根导体的在一个极距范围内所产生的平均电动势，再求一条支路的。

一个磁极极距范围内，平均磁密用  $B_{av}$  表示，极距为  $\tau$ ，电枢的轴向有效长度为  $l$ ，每极磁通为  $\Phi$ ，则

$$B_{av} = \frac{\Phi}{\tau l}$$



一根导体的平均电动势为： $e_{av} = B_{av} l v$

又因为

$$v = 2p\tau \frac{n}{60}$$

所以

$$e_{av} = 2p\Phi \frac{n}{60}$$

一条支路里的串联总导体数  $\frac{N}{2a}$  ( $N$  为电枢总导体数)

电枢电动势

$$\begin{aligned} E_a &= \frac{N}{2a} e_{av} = \frac{N}{2a} \times 2p\Phi \frac{n}{60} \\ &= \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n \end{aligned}$$

$C_e = \frac{pN}{60a}$  称为电动势常数



## 2.3.5 直流电机电枢绕组的电磁转矩

1) 一个导体的平均电磁力  $f_{av} = B_{av} l \cdot i_a$

2) 平均电磁力乘以电枢的半径，即得到一根导体所受的平均转矩

$$T_x = f_{av} \frac{D}{2}$$

3) 总的电磁转矩  $T_{em} = B_{av} l \frac{I_a}{2a} N \frac{D}{2} = \frac{\Phi}{l\tau} \cdot l \frac{I_a}{2a} N \frac{2p\tau}{2\pi}$

$$= \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = C_t \Phi I_a$$

$C_t = \frac{pN}{2\pi a}$  为转矩系数  $I_a = 2ai_a$  为电枢总电流



# 电动势常数和转矩常数

$C_e$ ,  $C_t$  对于一个具体的电机而言，是一个常数，并且通过换算，两者之间有一固定的关系：

$$\frac{C_t}{C_e} = \frac{60}{2\pi} = 9.55 \quad C_t = 9.55 C_e$$

## 直流电机的电磁功率

$$\begin{aligned} P_{\text{em}} &= E_a I_a = C_e \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\Omega}{2\pi} I_a \\ &= \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \Omega = T_{\text{em}} \Omega \end{aligned}$$



## 2.4 直流发电机的基本特性

直流发电机在拖动系统中大都作为电源使用，目前直流发电机有被大功率可控硅整流电源取代的趋势，但有些系统中还要使用。

### 2.4.1 直流发电机的基本方程式

- 基本方程式：
- 1、电端口的电压平衡方程式
  - 2、机械端口的转矩平衡方程式

# 1) 电压方程

他励磁电机  $I = I_a$

对励磁回路:  $U_f = I_f R_f$

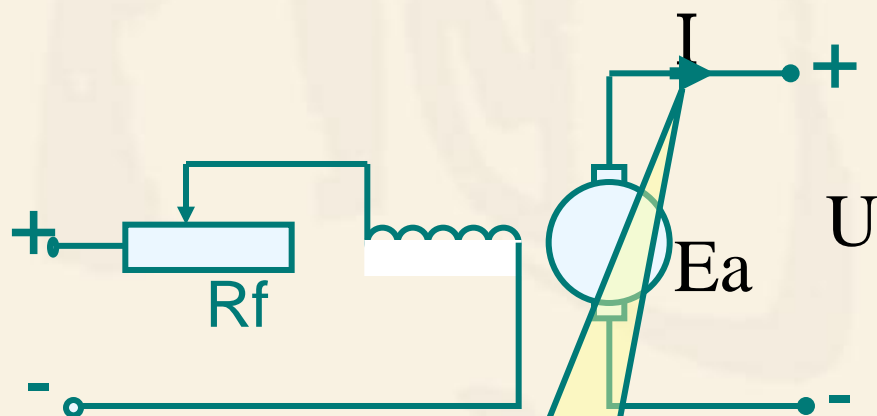
对电枢回路:

$$\begin{aligned} E_a &= U + I_a r_a + 2\Delta U_b \\ &= U + I_a R_a \end{aligned}$$

式中  $r_a$ : 电枢绕组电阻,

$2\Delta U_b$ : 正、负一对电刷上的接触电压降,

$R_a$ : 电枢回路总电阻, 包括电枢绕组电阻和电刷接触电阻。



直流发电机稳态电路

$E_a > U$ , 输出电流作为电枢电流的正方向

并励磁直流电机  $U_f = U$

对发电机  $I_a = I + I_f$

励磁回路和电枢回路的电压方程仍与他励磁相同

串励直流电机  $I = I_a = I_s$

$I_s$ : 串励绕组中励磁电流



## 2. 功率平衡方程式

输入功率:  $P_1 = P_{em} + p_{mec} + p_{Fe} + p_{ad}$

电磁功率:  $P_{em} = p_{cuf} + p_{cua} + P_2$

功率平衡:  $P_1 = p_{mec} + p_{Fe} + p_{ad} + p_{cua} + p_{cuf} + P_2$

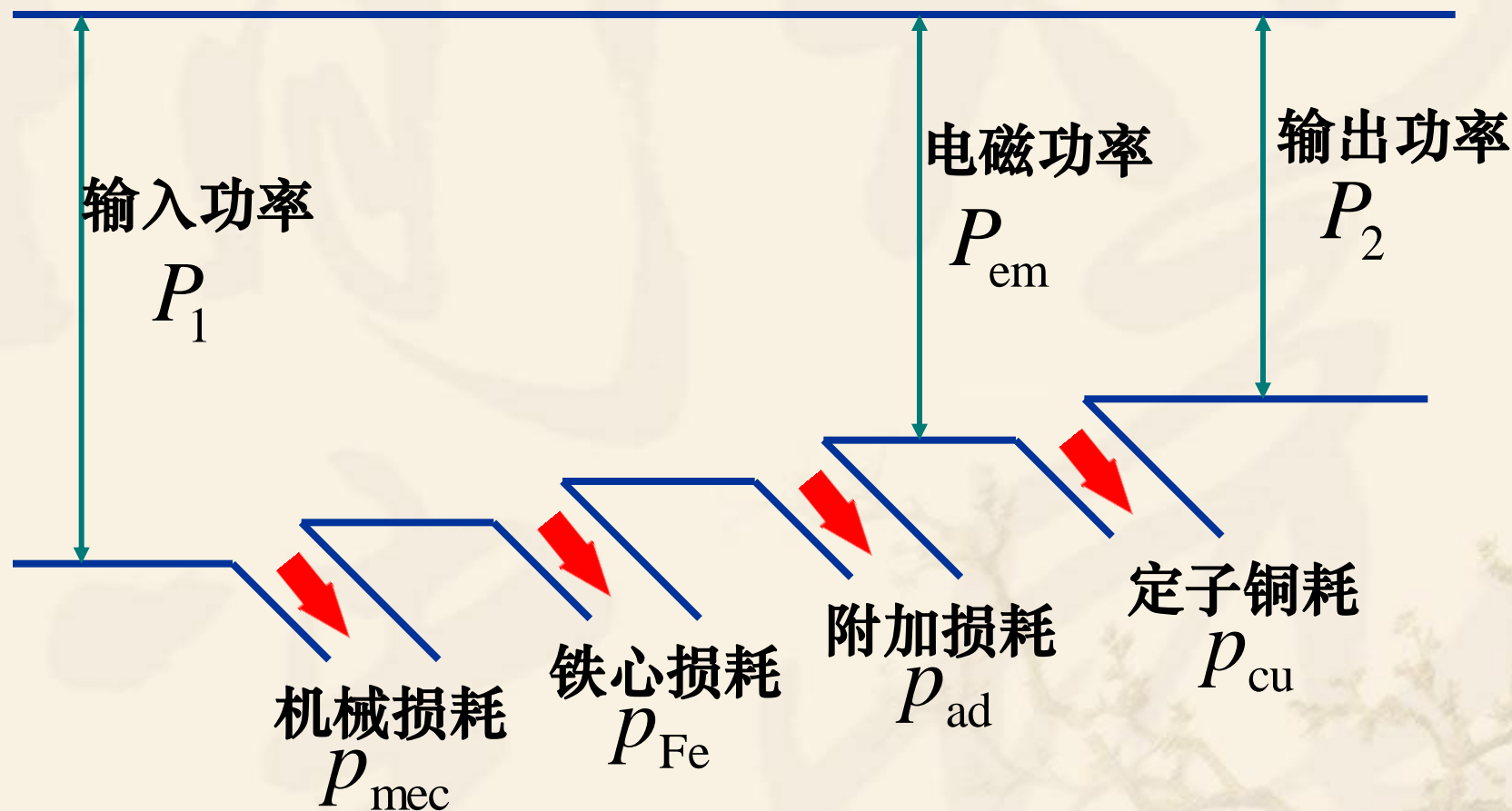
$$P_2 = UI$$

电磁功率 

$$\begin{aligned} P_{em} &= E_a I_a = C_e \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\Omega}{2\pi} I_a \\ &= \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \Omega = T_{em} \Omega \end{aligned}$$



## 直流发电机有功功率的流程图



## 发电机的效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}$$

额定负载时，直流发电机的效率与电机的容量有关。

10kW以下的小电机，效率约为75%~88.5%；

10~100kW的，效率约为85%~90%；

100~1000kW的电机，效率约为88%~93%。

### 3 转矩方程

原动机以 $T_1$ 的转矩拖动转子沿逆时针方向旋转，则 $E_a$ 、 $I_a$ 、 $T_{em}$ 的方向如图所示， $T_e$ 的方向与 $T_1$ 相反，为制动性质的转矩， $T_e$ 为拖动转矩。则：

$$T_1 = T_{em} + R_O \Omega = T_{em} + T_0$$

其物理意义为：当电机作为发电机运行时，拖动转矩 $T_1$ 与发电机内部产生的制动性质转矩 $T_{em}$ 和电机本身的机械阻力转矩 $T_0$ 相平衡。



**例题2-1** 一台并励直流发电机， $P_N=35\text{kW}$ ， $U_N=115\text{V}$ ， $n_N=1450\text{ r/min}$ ，电枢回路电阻 $R_a=0.0243\Omega$ ，一对电刷压降 $2\Delta U_b=2\text{V}$ ，励磁回路电阻 $R_f=20.1\Omega$ ，求额定时的电磁功率和电磁转矩？

解：励磁电流  $I_f = \frac{U}{R_f} = \frac{115}{20.1} = 5.72\text{A}$

负载电流  $I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{35000}{115} = 304.3\text{A}$

电枢电流  $I_a = I_N + I_f = 304.3 + 5.72 = 310\text{A}$

电枢电动势  $E_a = U_N + I_a R_a + 2\Delta U_b$   
 $= 115 + 310 \times 0.0243 + 2 = 124.533\text{V}$

电磁功率  $P_{em} = E_a I_a = 124.533 \times 310 = 38605.23\text{W}$

电磁转矩  $T_{em} = 9550 \frac{P_{em}}{n_N} = 9550 \times \frac{38.605}{1450} = 254.2\text{Nm}$



## 2.4.2 他励直流发电机的运行特性

所谓运行特性，就是要找出电机在工作过程中所展现的某些特性，并将这些特性用曲线的形式进行表示，在直流电机中，我们要重点掌握的有：

**(1) 负载特性：**指当 $n=\text{常数}$ 且 $I_f=\text{常数}$ 时， $U=f(I_f)$ 的关系，其中当 $I=0$ 时的特性 $U_0=f(I_f)$ 称为发电机的空载特性

**(2) 外特性：**指当 $n=\text{常数}$ ，且 $I_f=\text{常数}$ 或 $R_f=\text{常数}$ 时， $U=f(I)$

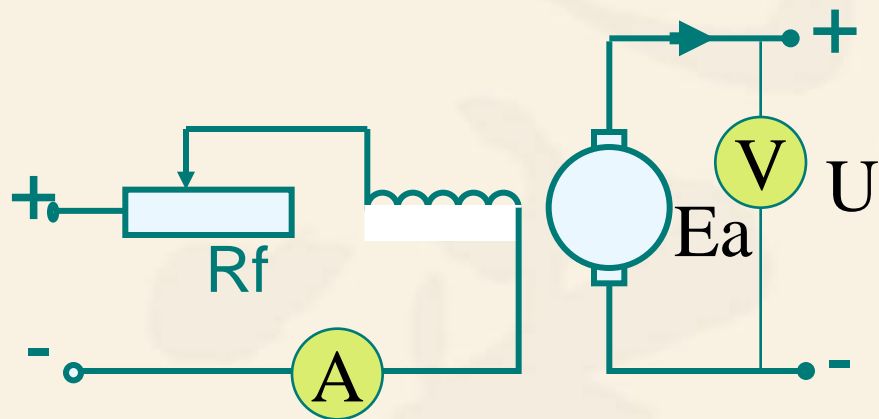
**(3) 调节特性：**指当 $n=\text{常数}$ 且 $U=\text{常数}$ 时， $I_f=f(I)$

# 1.空载特性

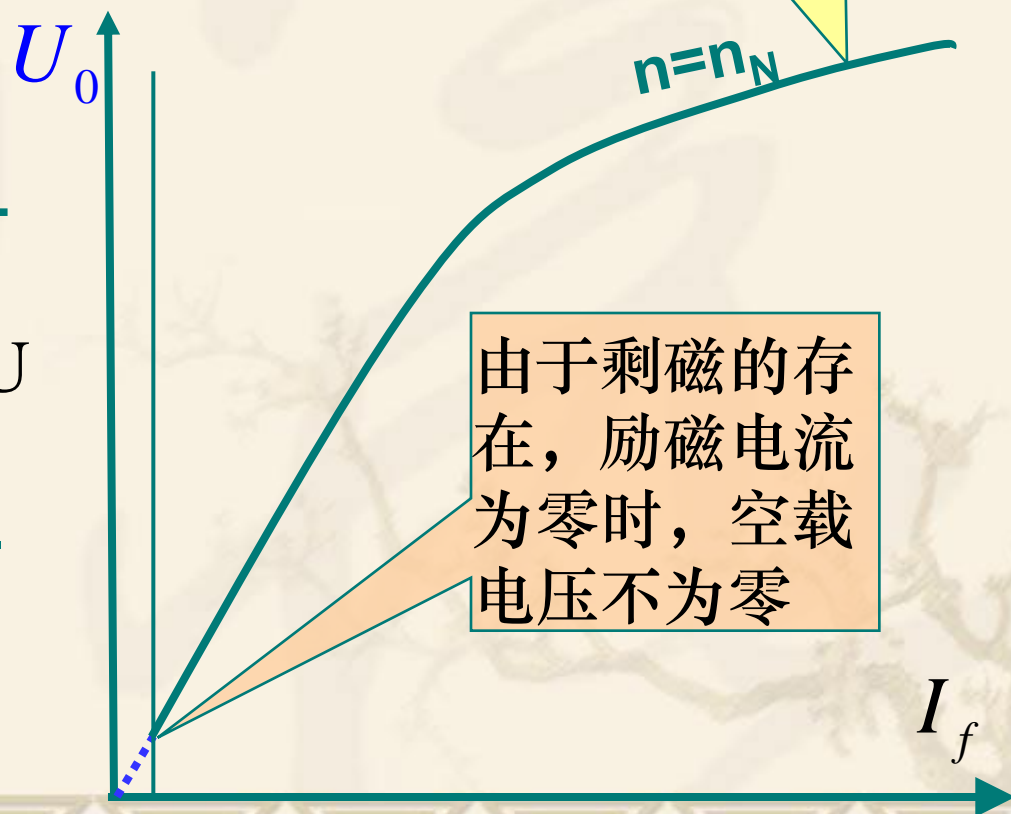
$$n = n_N = C \quad I = 0 \Rightarrow$$

$$U_0 = f(I_f)$$

$E_0$ 正比于 $\Phi_0$ ,  $I_f$ 正比于 $F_f$   
空载特性 $U_0 = f(I_f)$ 等价于电机的  
磁化特性 $\Phi_0 = f(F_f)$



直流发电机空载试验

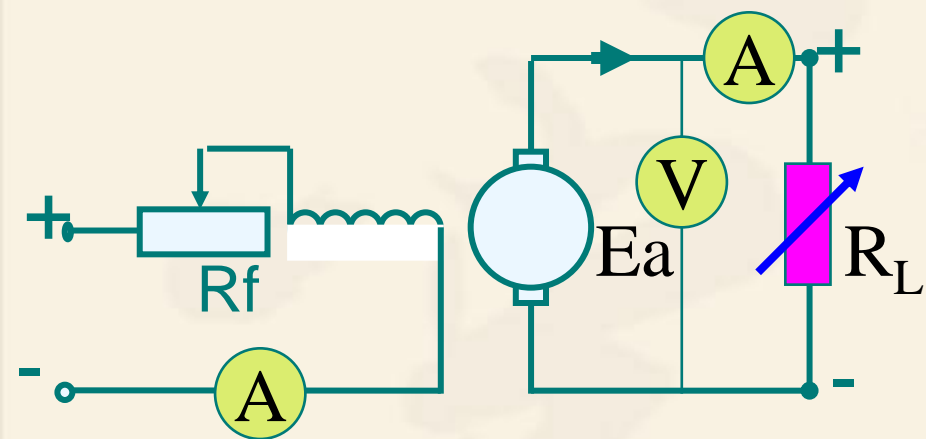


## 2. 负载特性

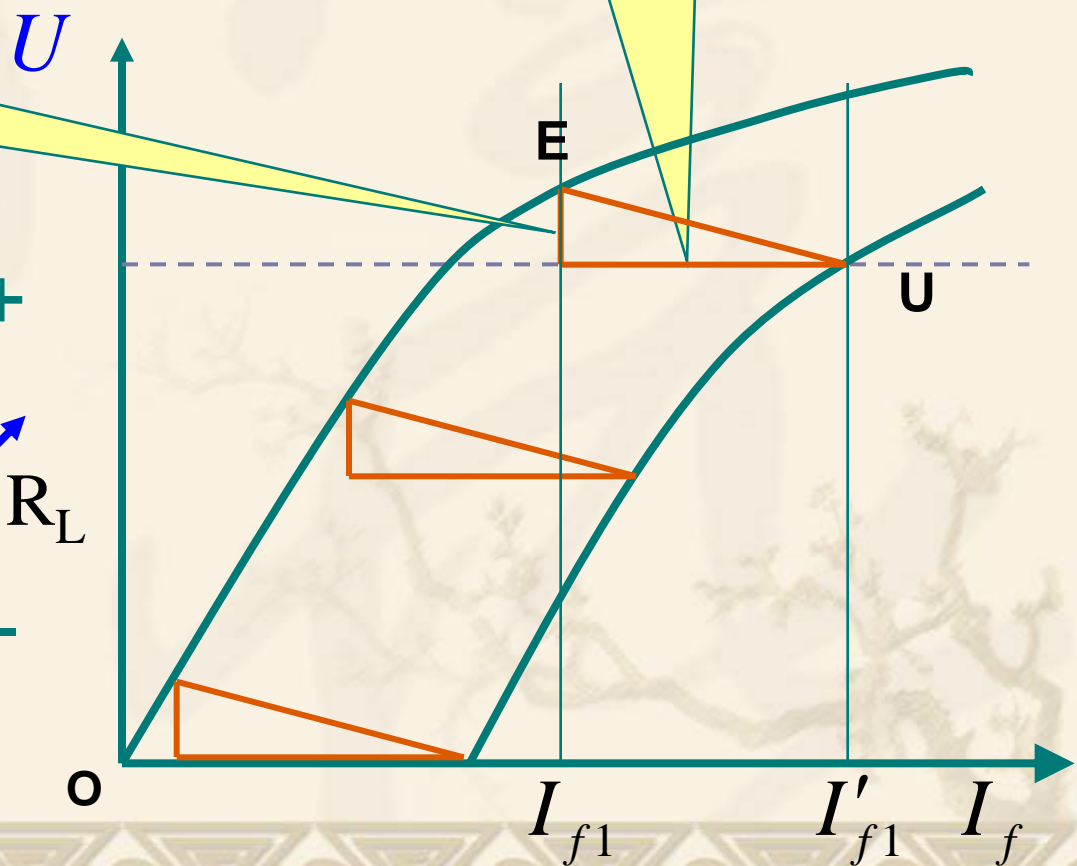
$$n = n_N = C \quad I = C' \Rightarrow U_0 = f(I_f)$$

电枢回路电阻的压降

去磁的电枢反应所增加的励磁



直流发电机负载试验





### 3. 外特性

$n = n_N = C$   $I = \text{常值}$   $U = f(I)$  的关系

用实验方法测取外特性时，发电机电枢加入负载电阻  $R_L$ ，当  $n = n_N = C$  时，调  $R_L$  和  $I_f$  使

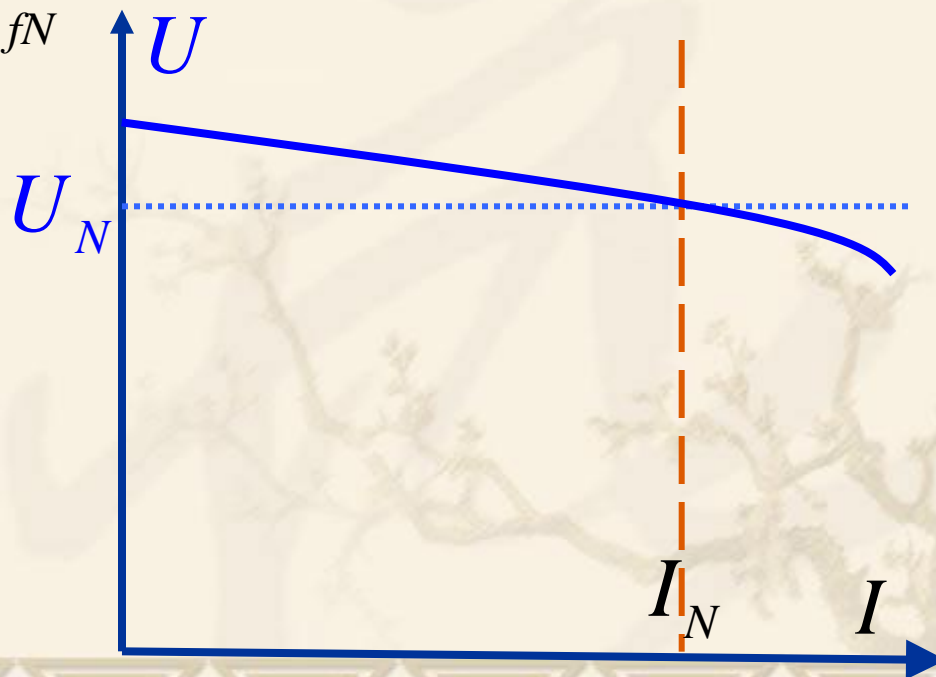
$U = U_N$ ,  $I = I_N$ , 此时  $I_f = I_{fN}$

然后保持  $I_{fN}$  不变，变  $R_L$

使  $I$  逐渐减小测取  $U$ ,  $I$ ,

即得

$$U = f(I)$$



随着负载的增加，电压U下降的原因

由电压方程

$$U = E_a - I_a R_a = C_e \Phi n - I_a R_a$$

1) 去磁作用

$$I_a \uparrow \rightarrow \Phi \downarrow \rightarrow E \downarrow \Rightarrow U \downarrow$$

2) 电枢电阻的压降

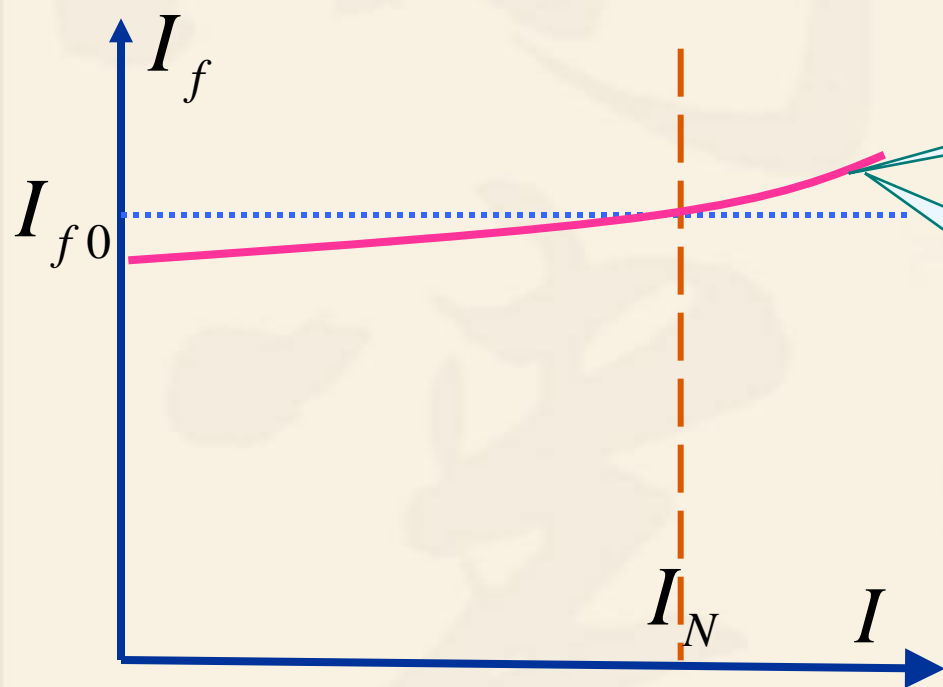
$$I_a \uparrow \rightarrow I_a R_a \rightarrow U \downarrow$$

发电机端电压随负载而变化的程度用电压调整律来衡量，发电机从额定负载过渡到空载时，端电压变化的数值与额定电压的比值，称为额定电压调整率。

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_N}{U_{N(I_f = I_N)}} \times 100\%$$

## 4. 调节特性

$$n = n_N = C \quad U = U_N = C \Rightarrow I_f = f(I)$$



曲线为什么是一条上翘的曲线???

- 1) 补偿去磁的电枢反应
- 2) 电枢回路电阻压降

## 2.4.3 并励发电机的自励和运行特性

### 1. 并励发电机的自励

并励和复励都是一种自励发电机，即不需要外部电源供给励磁电流，这种自励发电机首先是在空载时建立电压即所谓“自励”，然后再加负载。

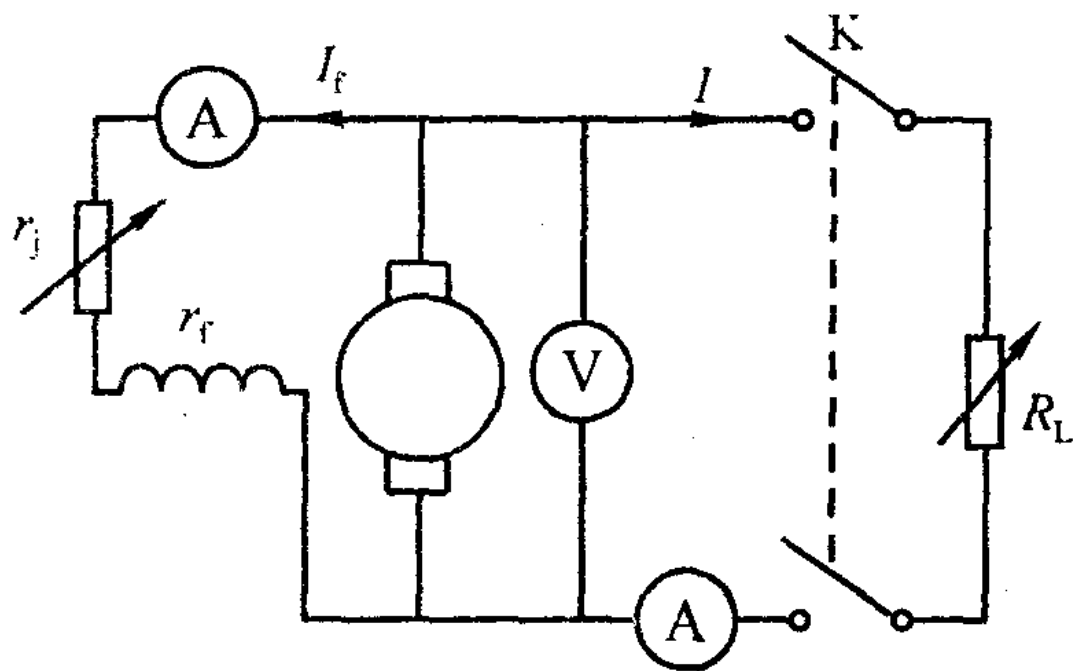
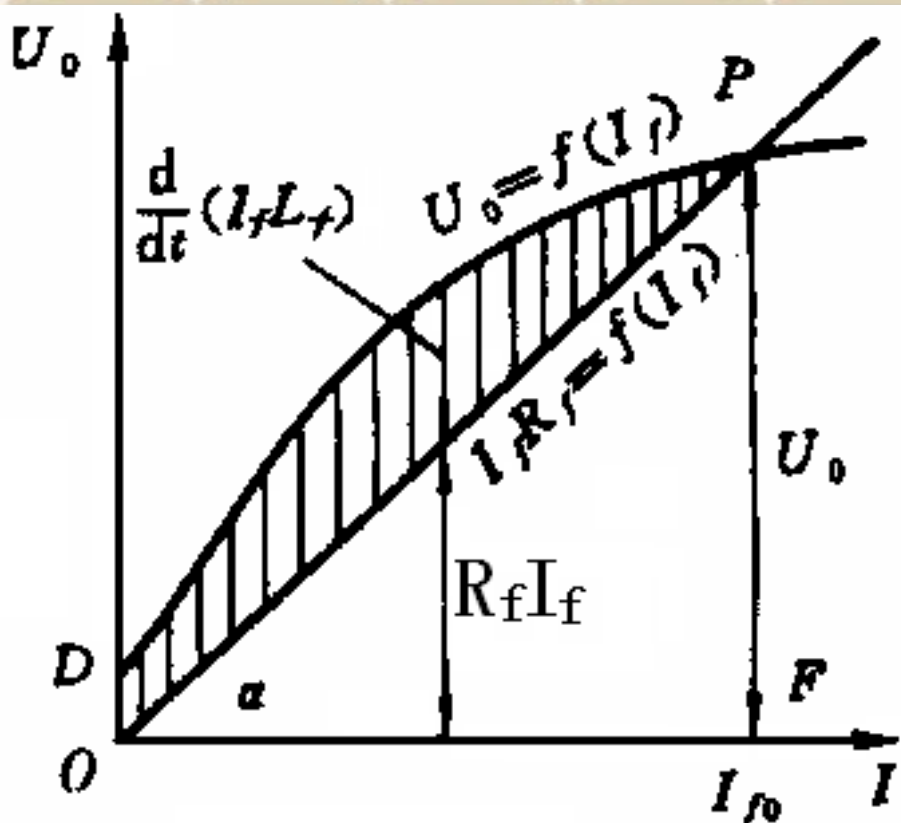


图 2.44 并励发电机特性实验接线图



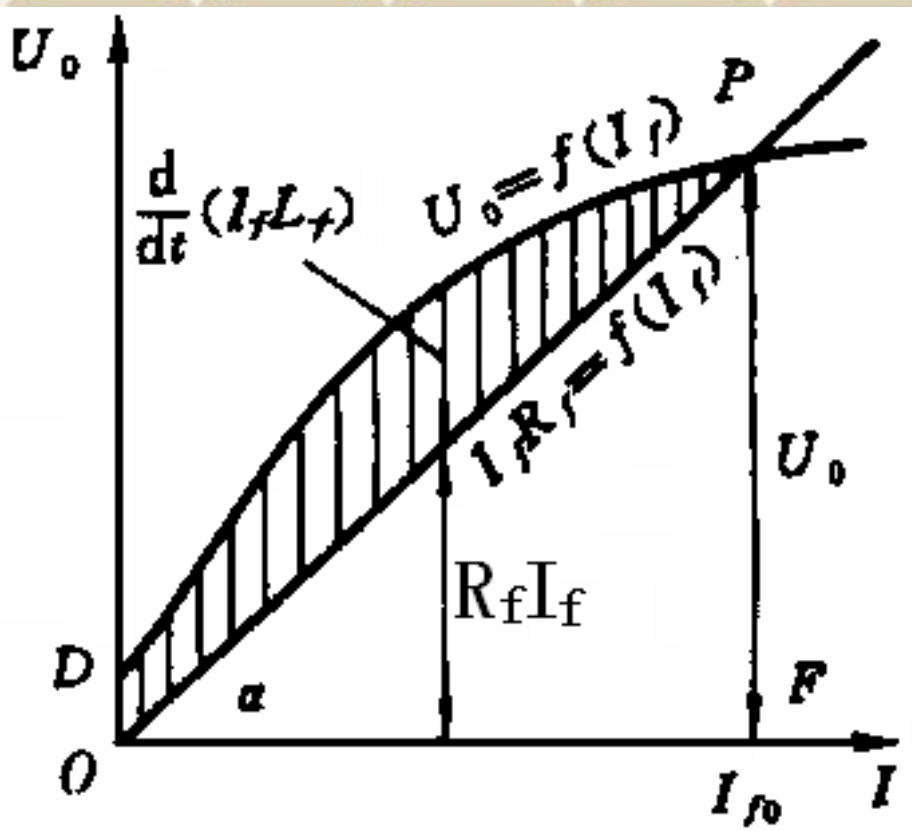


由于电机磁路中总有一定剩磁，当发电机由原动机推动至额定转速时，发电机两端将发出一个数值不大的剩磁电压。

励磁绕组又是接到电枢两端的，在剩磁电压的作用下，励磁绕组将流过一个不大的电流，并产生一个不大的励磁磁动势。

在比较高的励磁电压作用下，励磁电流又进一步加大，导致磁通的进一步增加，继而电枢端电压又进一步加大。

如果励磁绕组接法正确，即这个励磁磁动势的方向和电机的剩磁磁动势的方向相同，使电机内的磁通和由它产生的电枢端电压有所增加。



在自励过程中，发电机的电压是否会无限制地增长下去呢？

从图可以清楚地看出，当发电机的电压上升到P点所对应的电压时，恰好等于励磁电流通过励磁回路所需的电阻压降，因此电枢电压和励磁电流都不会再增加，自励过程达到了稳定状态。



## 并励发电机的自励条件：

- 1) 电机必须有剩磁。
- 2) 励磁绕组的接线与电枢旋转方向必须正确配合，以使励磁电流产生的磁场方向与剩磁方向一致。
- 3) 励磁回路的电阻应小于与电机运行转速相对应的临界电阻。

**必须明确**，发电机的转速不同时，空载特性也不同。因此，对应于不同的转速便有不同的临界电阻。

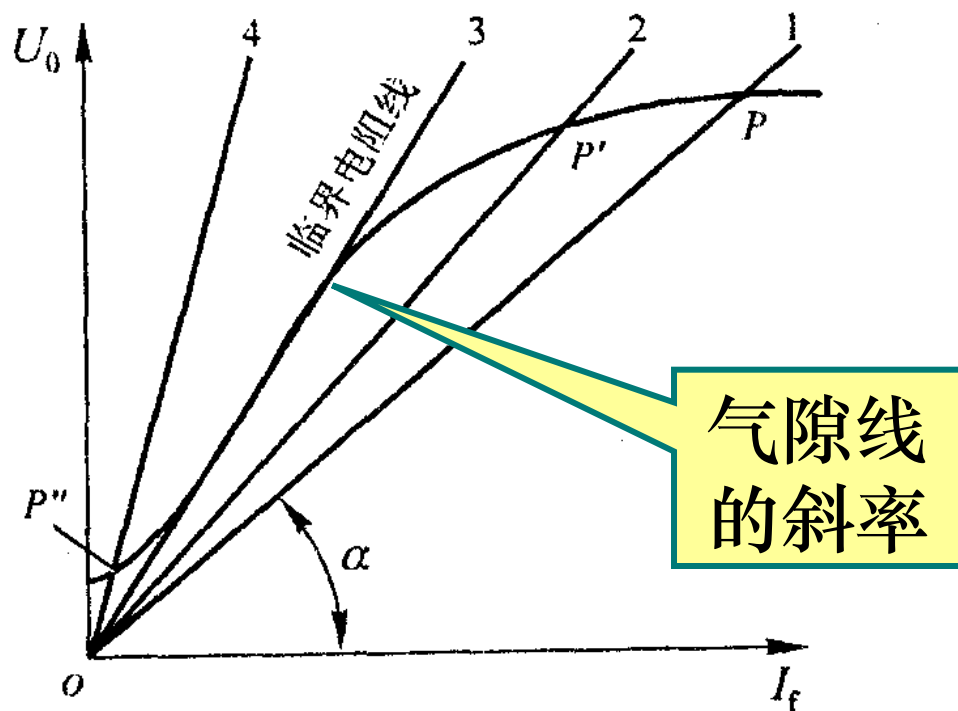


图 2.45 并励发电机的自励条件

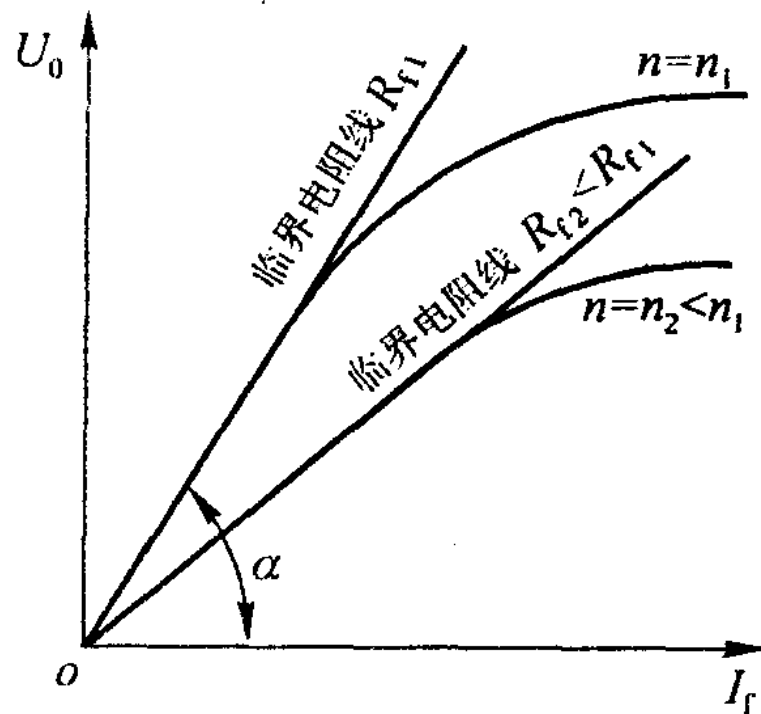


图 2.46 不同转速的临界电阻

如果励磁绕组本身的电阻即已超过所对应的临界电阻值，电机是不可能自励的，这时唯一的办法是提高电机的转速，从而提高其临界电阻值。



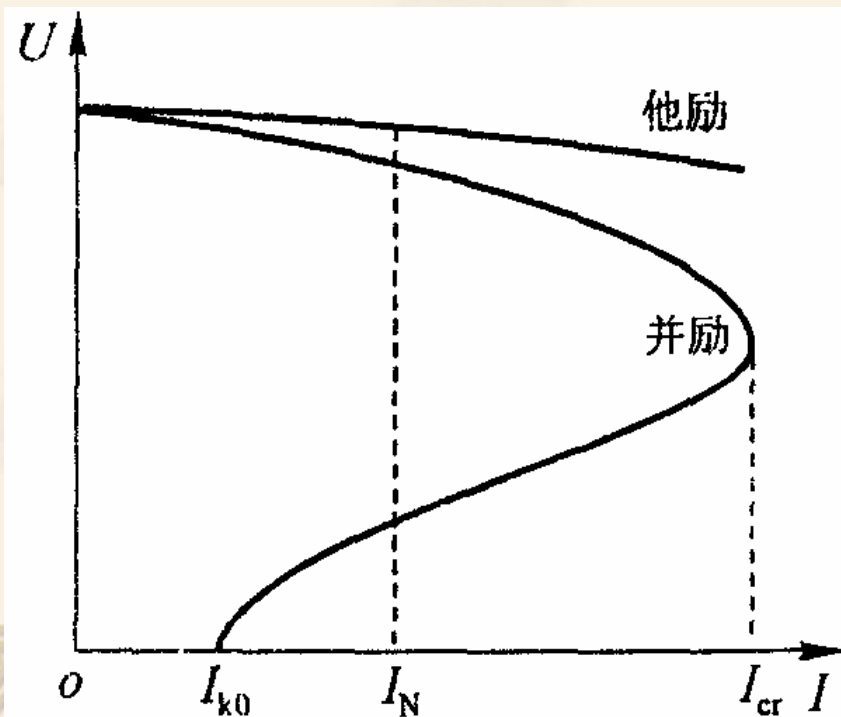
## 2. 并励发电机的运行特性

与他励相同，也有外特性，调整特性和效率特性。  
调整特性和效率特性与他励十分相近，仅说明其外特性。  
外特性：

$$n = n_N = C \quad R_f = \text{常值} \quad U = f(I) \text{ 的关系}$$

与他励外特性比较，并励的外特性有三个特点：

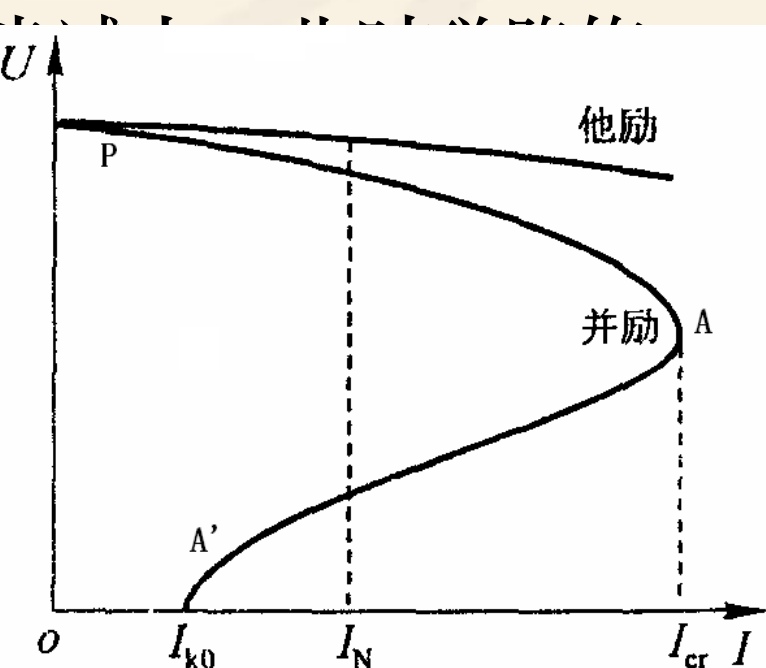
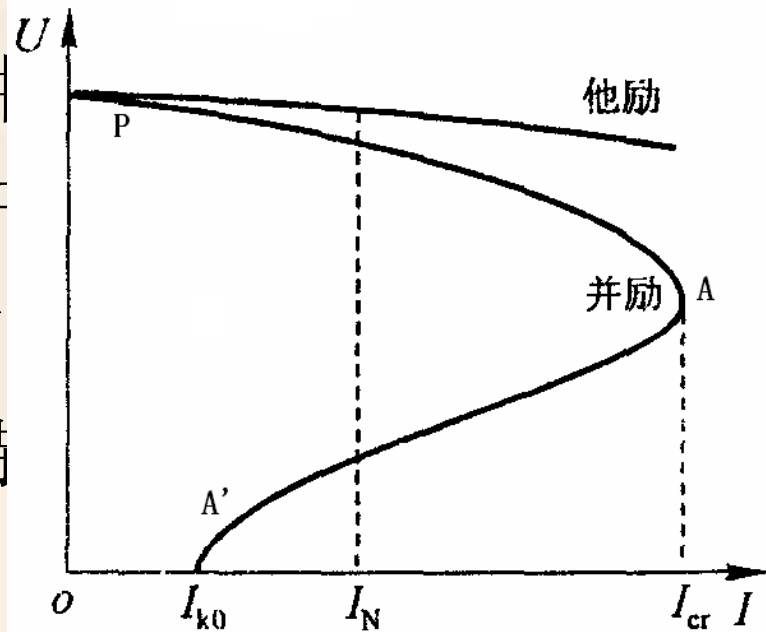
- 1) 同一负载电流下，端电压较低。
- 2) 外特性有“拐弯”现象。
- 3) 稳定短路电流小



# 为什么外特性会出现“拐弯”现象？

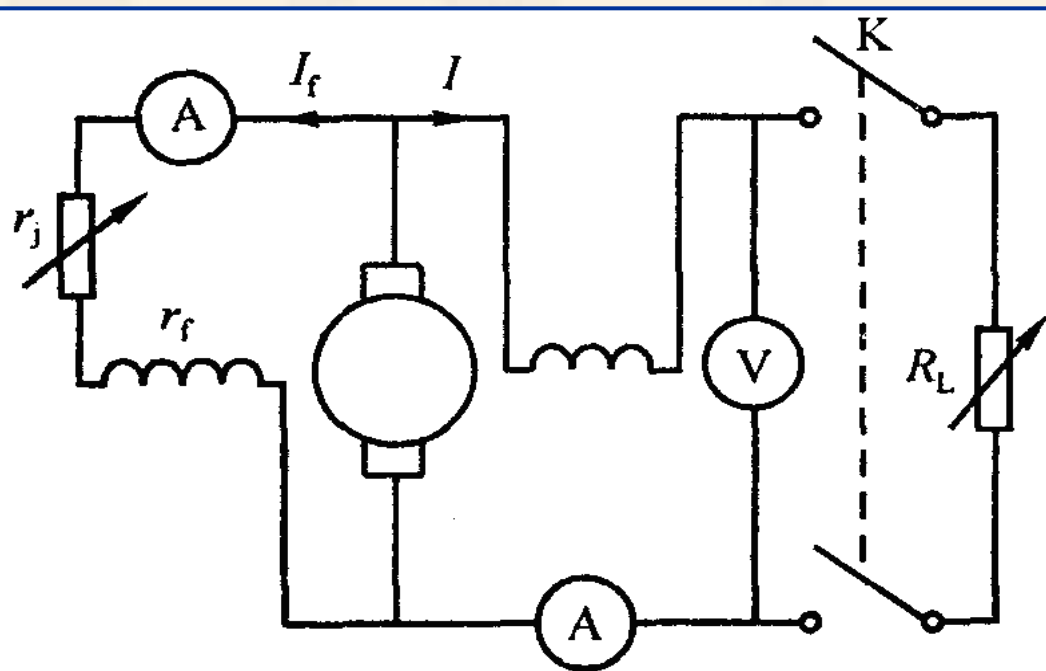
$I = U / R_L$  在磁路比较饱和的区域中  
 随  $R_L \downarrow \rightarrow I \uparrow \rightarrow U \downarrow \rightarrow I_f \downarrow$  , 由  
 以由于  $I_f$  的减少而引起  $E_a$  和  $U$  的减  
 减小, 负载电流增大, 一直到外特  
 电流称为临界电流约为  $(2 \sim 3) I_N$

若  $R_L$  进一步减小,  $U$  和  $I_f$  进一  
 和度降低 (图中  $A'A$  段),  $I_f$  的稍  
 很大下降, 致使端电压  $U$  下降的幅  
 于是外特性出现“拐弯”现象, 即  
 负载电流反而下降。

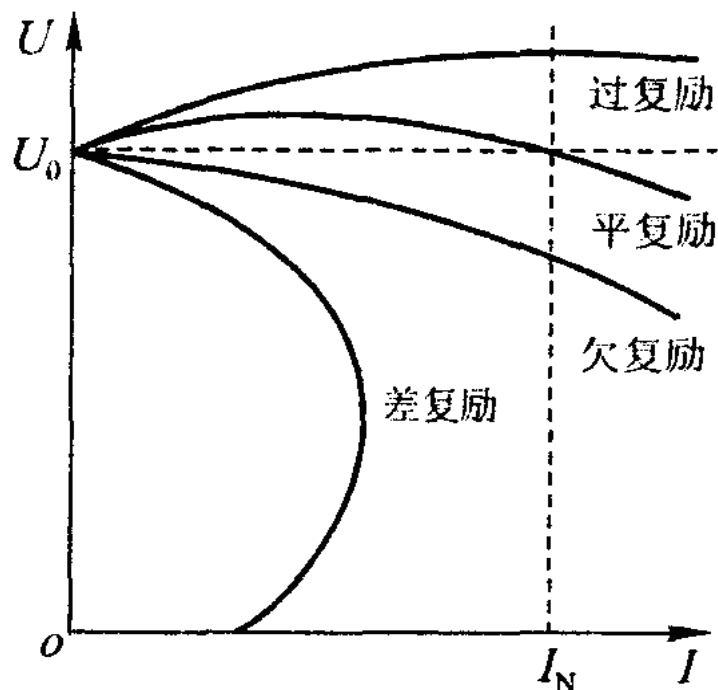


## 2.4.4 复励发电机的运行特性

复励发电机有并励绕组和串励绕组两个励磁绕组，而串励绕组的作用是随着负载电流的增加增磁，补偿了并励绕组的去磁作用。所以复励发电机的外特性较平直。



复励发电机的实验接线图



复励发电机的外特性

## 2.5 直流电动机的基本特性

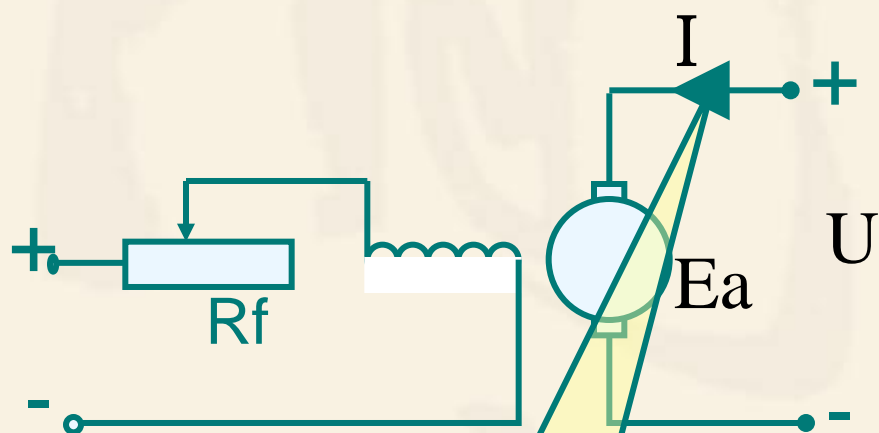
直流电动机是直流发电机的一种逆运行状态，将电能变为机械能。所以直流电动机稳定运行特性最主要的就是转矩——转速特性即机械特性。。

### 2.5.1 基本方程

- 基本方程式：
- 1、电端口的电压平衡方程式
  - 2、机械端口的转矩平衡方程式



# 1.电压方程



直流电动机稳态电路

$U > E_a$ , 输入电流作为电枢电流的正方向

他励磁电机  $I = I_a$

对励磁回路:  $U_f = I_f R_f$

对电枢回路:

$$U = E_a + I_a r_a + 2\Delta U_b$$

$$= E_a + I_a R_a$$

式中  $r_a$ : 电枢绕组电阻,

$2\Delta U_b$ : 正、负一对电刷上的接触电压降,

$R_a$ : 电枢回路总电阻, 包括电枢绕组电阻和电刷接触电阻。

并励磁直流电机  $U_f = U$

对电动机  $I = I_a + I_f$

励磁回路和电枢回路的电压方程仍与他励磁相同

串励直流电机  $I = I_a = I_s$

$I_s$ : 串励绕组中励磁电流

## 2.功率平衡方程式

输入功率： $P_1=UI$ （电功率）

$$\begin{aligned} P_1 &= UI = U(I_a + I_f) = UI_a + UI_f = (E_a + I_a R_a) I_a + U_f I_f \\ &= E_a I_a + I_a^2 R_a + U_f I_f = P_{em} + P_{cua} + P_{cuf} \end{aligned}$$

电磁功率： $P_{em} = T_{em} \Omega = (T_2 + T_0) \Omega = T_2 \Omega + T_0 \Omega = P_2 + P_0$

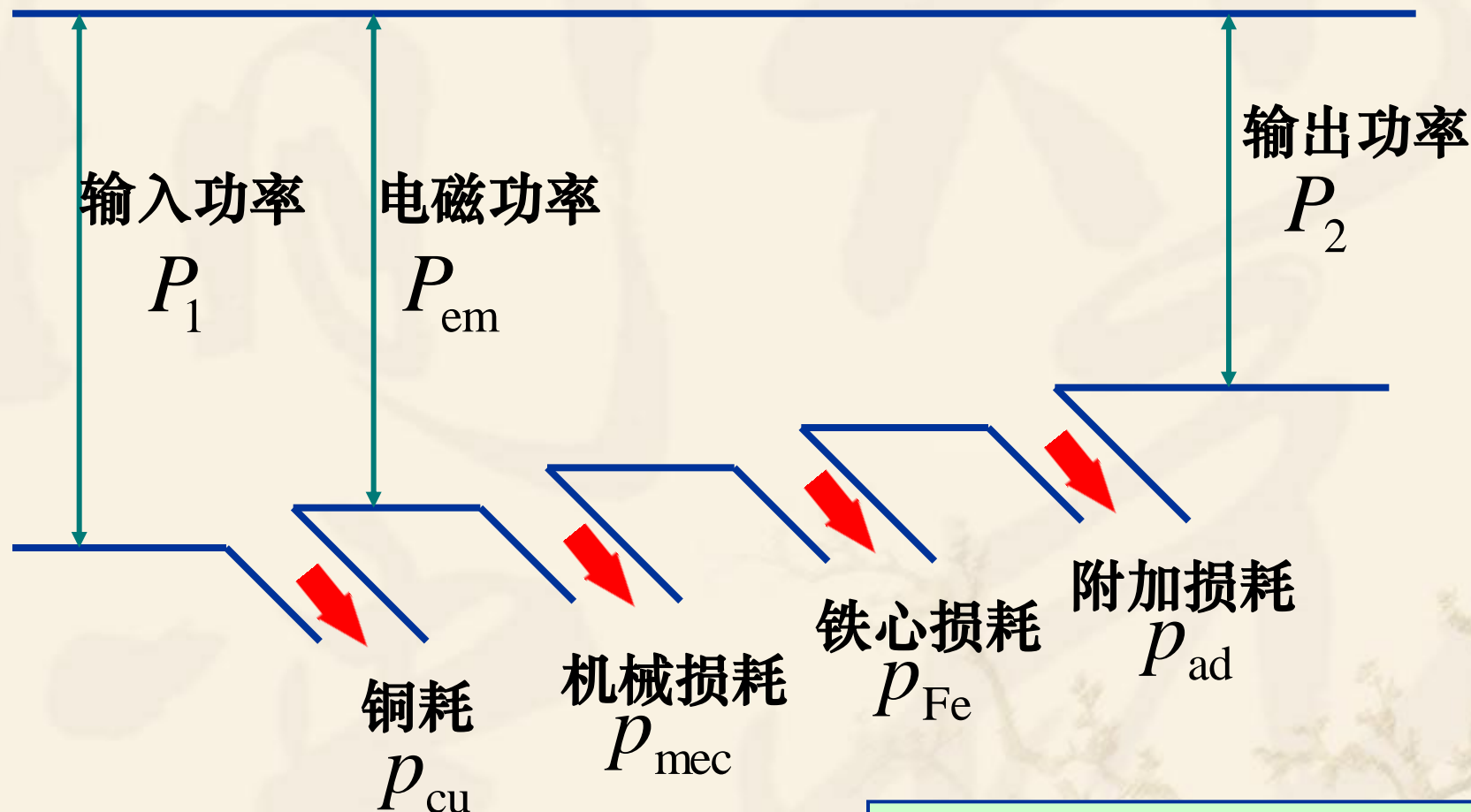
功率平衡： $P_1 = P_e + P_{cua} + P_{cuf} = P_2 + P_0 + P_{cua} + P_{cuf}$

电磁功率 

$$\begin{aligned} P_{em} &= E_a I_a = C_e \Phi n I_a = \frac{pN}{60a} \Phi \frac{60\Omega}{2\pi} I_a \\ &= \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \Omega = T_{em} \Omega \end{aligned}$$



## 直流电动机功率的流程图



电动机的效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}$$



### 3.转矩方程

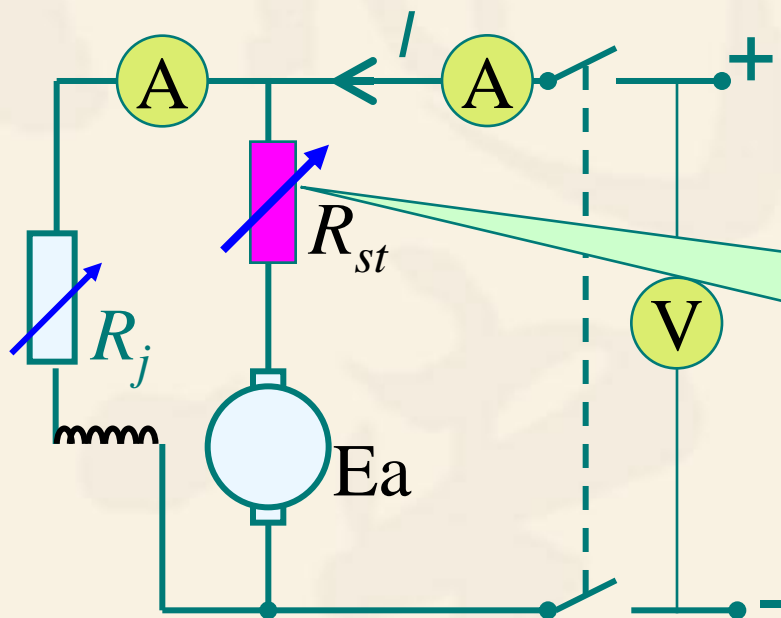
电动机 $T_{em}$ 的转矩拖动负载（转矩为 $T_2$ ）旋转，考虑到空载制动转矩的存在， $T_2+T_0$ 为制动性质的转矩， $T_{em}$ 为拖动转矩，则：

$$T_{em} = T_2 + T_0$$

其物理意义为：当电机作为电动机运行时，拖动转矩 $T_{em}$ 与负载的制动性质转矩 $T_2$ 和电机本身的机械阻力转矩 $T_0$ 相平衡。

## 2.5.2 直流电动机的工作特性

直流电动机的工作特性，是指 $U=U_N$ ， $I_f=I_{fN}$ 时，转速 $n$ 、电磁转矩 $T_{em}$ 和效率 $\eta$ 随输出功率 $P_2$ 而变化的关系。



起动时接入起动电阻，起动完毕后将电阻切除。

并励电动机试验接线图

# 一、他励（并励）直流电动机的工作特性

## 1. 转速特性

当  $U = U_N$ ,  $R_c = 0$ ,  $I_f = I_{fN}$  时,  $n = f(P_2)$  的关系, 叫做转速特性。

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I_a$$

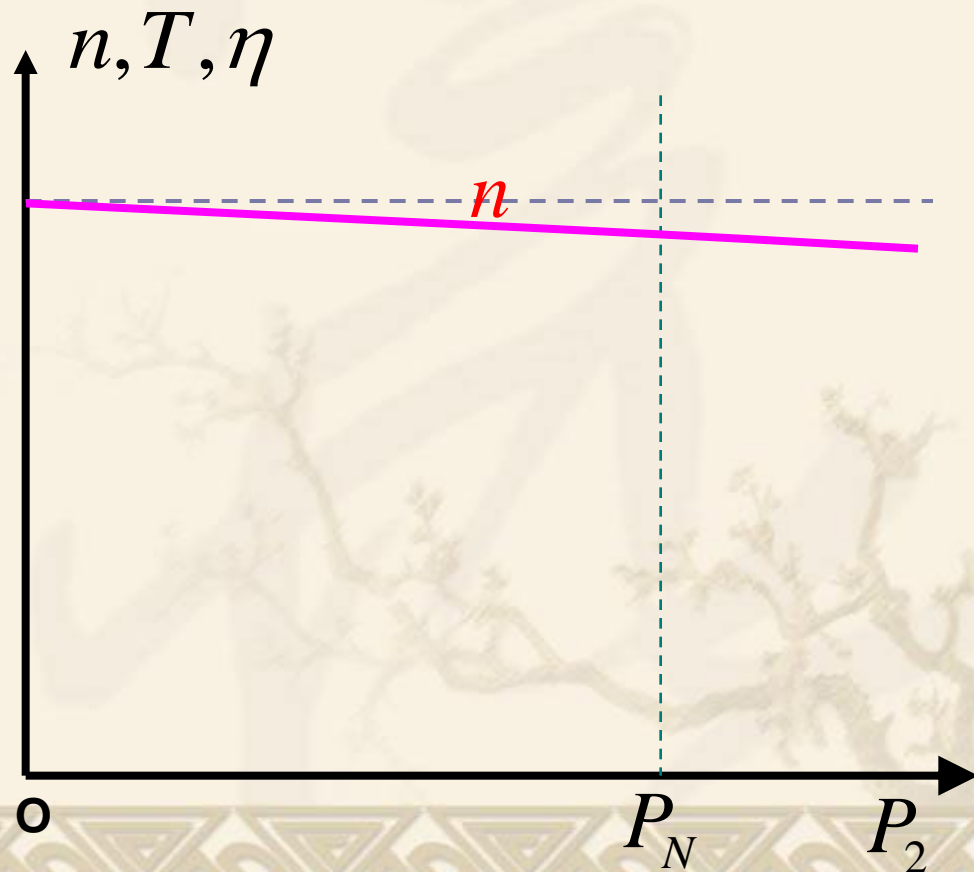
$$= n_0 - \frac{R_a I_a}{C_e \Phi}$$

P2增加



Ia增加

转速n下降



## 2.转矩特性

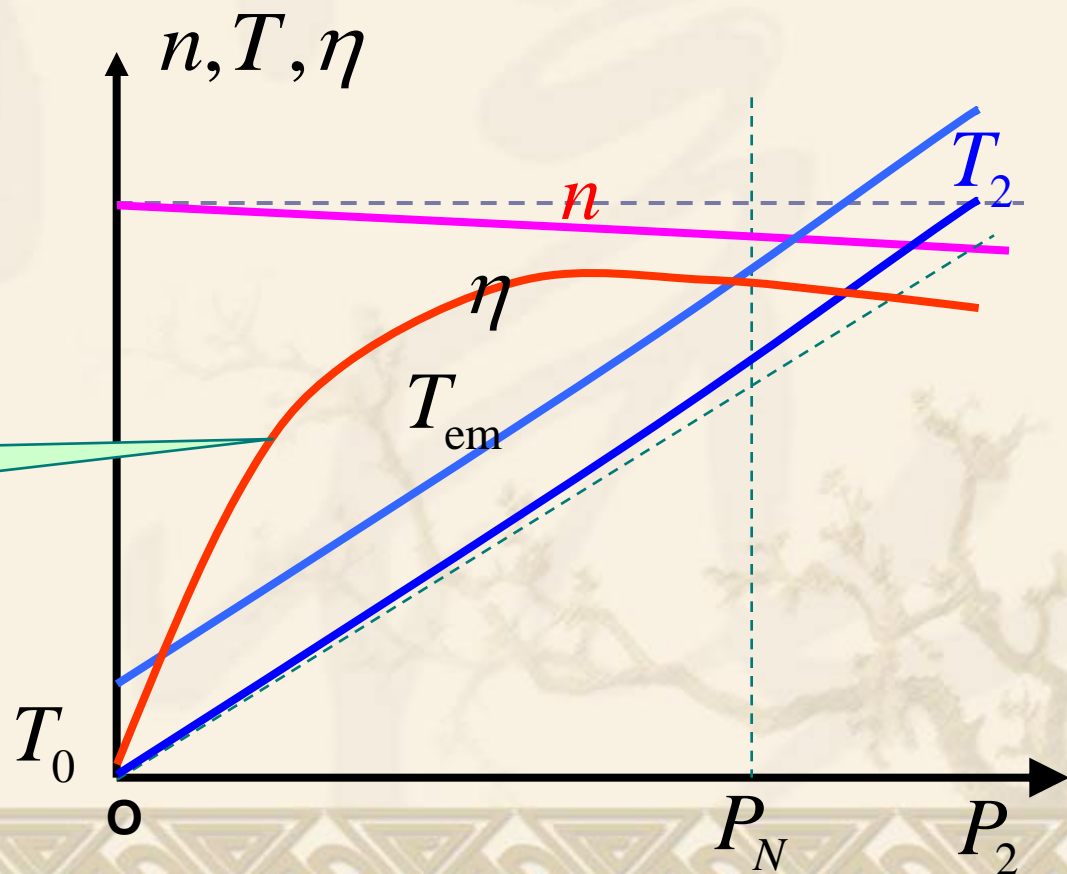
$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega}$$

随负载的增加，转速略有下降，则该曲线为过原点，上翘的曲线

$$\text{电磁转矩 } T_{\text{em}} = T_2 + T_0$$

## 3.效率特性

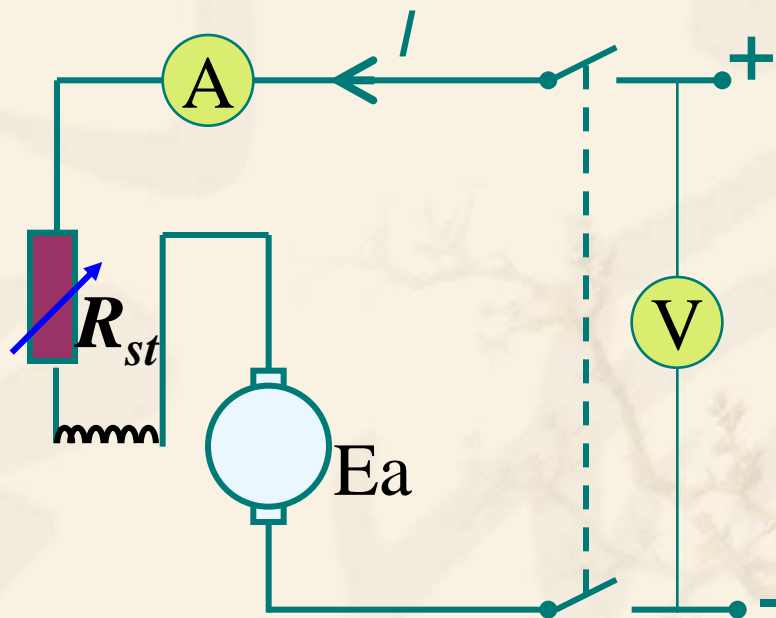
典型的效率曲线





## 二、串励直流电动机的工作特性：

由于串励电动机的励磁绕组与电枢串联，所以励磁电流就是电枢电流，即它是随负载的变化而变化的。因此，其工作特性将与他（并）励直流电机的工作特性有所不同。



串励电动机试验接线图



# 1.转速特性

$$U = U_N, R_S = \text{常值} \quad n = f(I_a)$$

$$\because U = C_e \Phi n + I(R_a + R_S) = C_e n K_S I + I R'_a \quad \therefore n = \frac{U - I_a R'_a}{C_e \Phi}$$

串励的转速特性与并励截然不同，它随负载增加迅速降低，变化很大。

当空载时， $I_a \rightarrow 0, \Phi \rightarrow 0, n \rightarrow \infty$  转速达到危险的高速，称“飞车”现象，因此串励电动机不允许在空载或负载很小的情况下运行。转速特性与纵轴无交点。其转速调整率定义为：

$$\Delta n = \frac{n_{1/4} - n_N}{n_N} \times 100\%$$

$n_{1/4}$  为输出功率等于  $1/4 P_N$  时的转速。

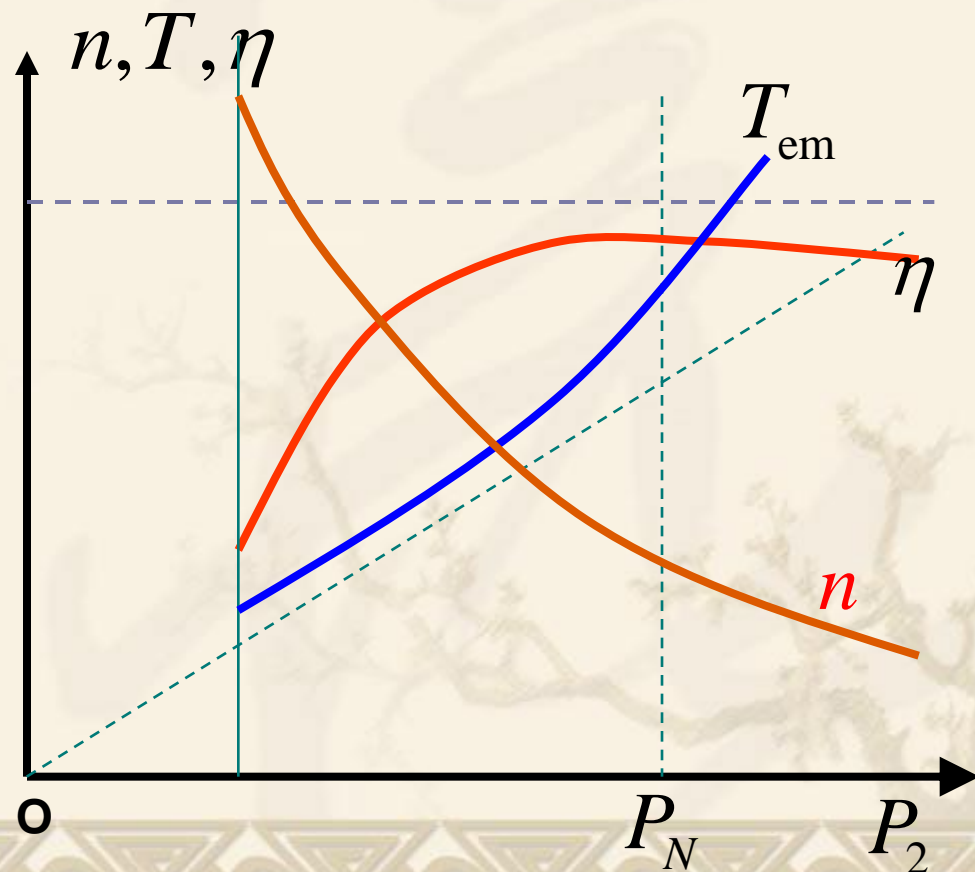
## 2. 转矩特性

$$T_2 = \frac{P_2}{\Omega}$$

随负载的增加，转速略有下降，则该曲线为一上翘的曲线

## 3. 效率特性

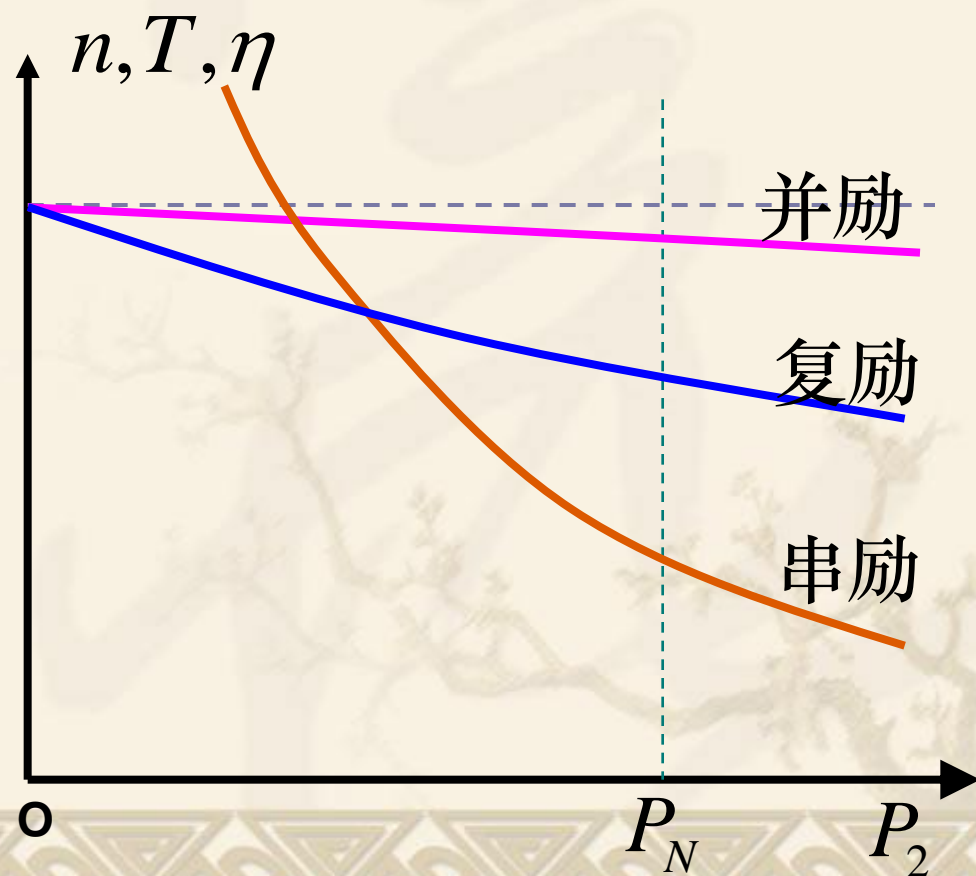
串励电动机的效率特性，和他（并）励电动机相似。



### 三、复励直流电动机的工作特性

复励电动机通常接成积复励，它的工作特性介乎并励与串励电动机的特性之间。

如果并励磁动势起主要作用，其工作特性就接近并励电动机；若串励磁动势起主要作用，其工作特性就接近串励电动机。因为有并励磁动势，空载时没有飞车危险。







## 2.5.3 直流电动机的机械特性

### 一、并励电动机的机械特性

定义：在电动机的电枢电压、励磁电流、电枢回路电阻为恒值条件下，电机的转速与电磁转矩之间的关系： $n = f(T_{em})$

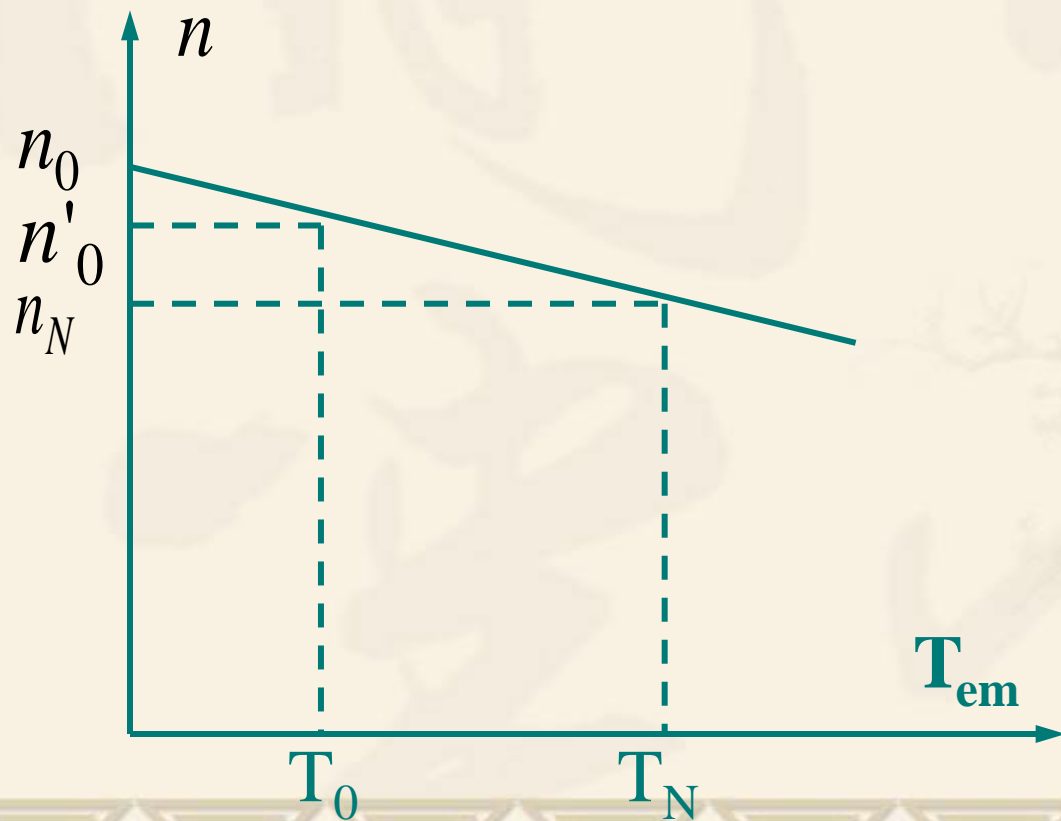
由电机的电路原理图可得机械特性的表达式：

$$\begin{aligned} n &= \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T_{em} \\ &= n_0 - \beta T_{em} \\ &= n_0 - \Delta n \end{aligned}$$





## 机械特性的曲线：



通常称  $\beta$  大的机械特性为软特性， $\beta$  小的机械特性为硬特性。



## 二、固有机机械特性和人为机械特性

### 1. 固有机机械特性

当  $U = U_N, \Phi = \Phi_N, R = R_a$  时的机械特性称为固有机机械特性:

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em}$$

### 2. 人为机械特性

当改变  $U$  或  $R_a$  或  $\Phi$  得到的机械特性称为人为机械特性

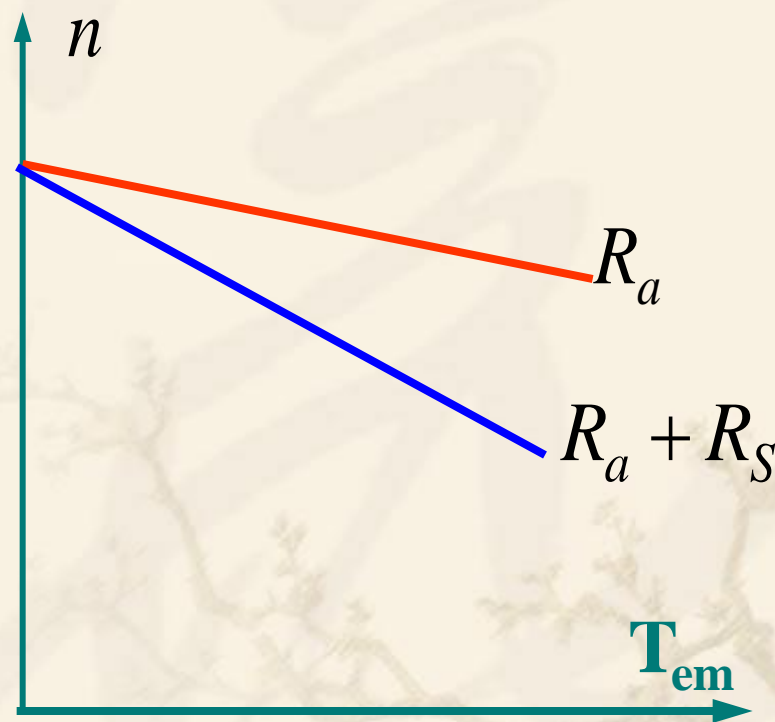


## 1) 电枢串电阻时的人为特性

保持  $U = U_N, \Phi = \Phi_N$  不变，只在电枢回路中串入电阻  $R_S$  的人为特性：

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R_S}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em}$$

特点：（1） $n_0$  不变， $\beta$  变大；  
（2） $R_S$  越大，特性越软。



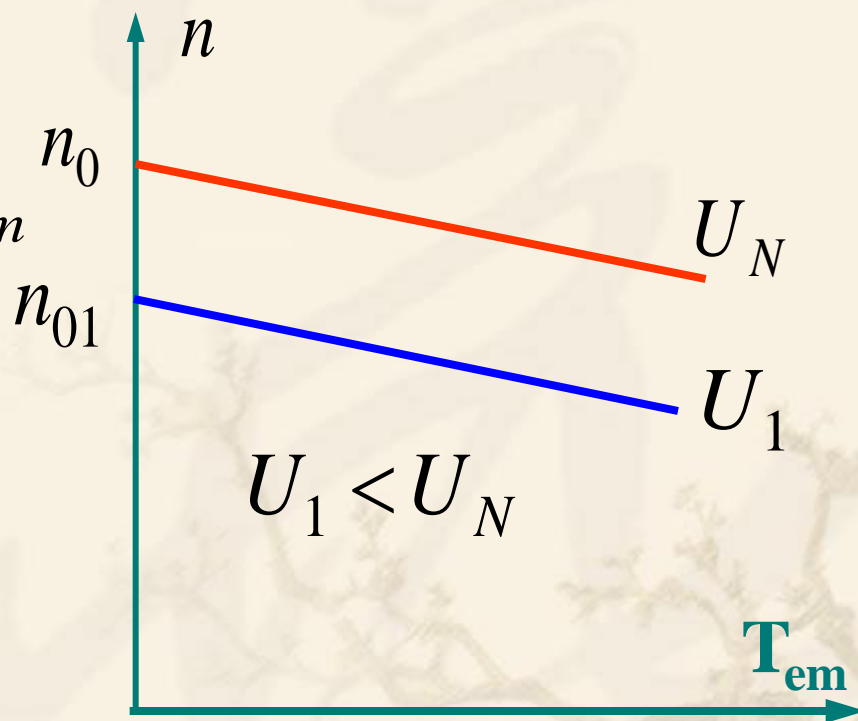


## 2) 降低电枢电压时的人为特性

保持  $R = R_a, \Phi = \Phi_N$  不变, 只改变电枢电压  $U$  的人为特性:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2} T_{em}$$

特点: (1)  $n_0$  随  $U$  变化;  
(2)  $U$  不同, 曲线是一组平行线。



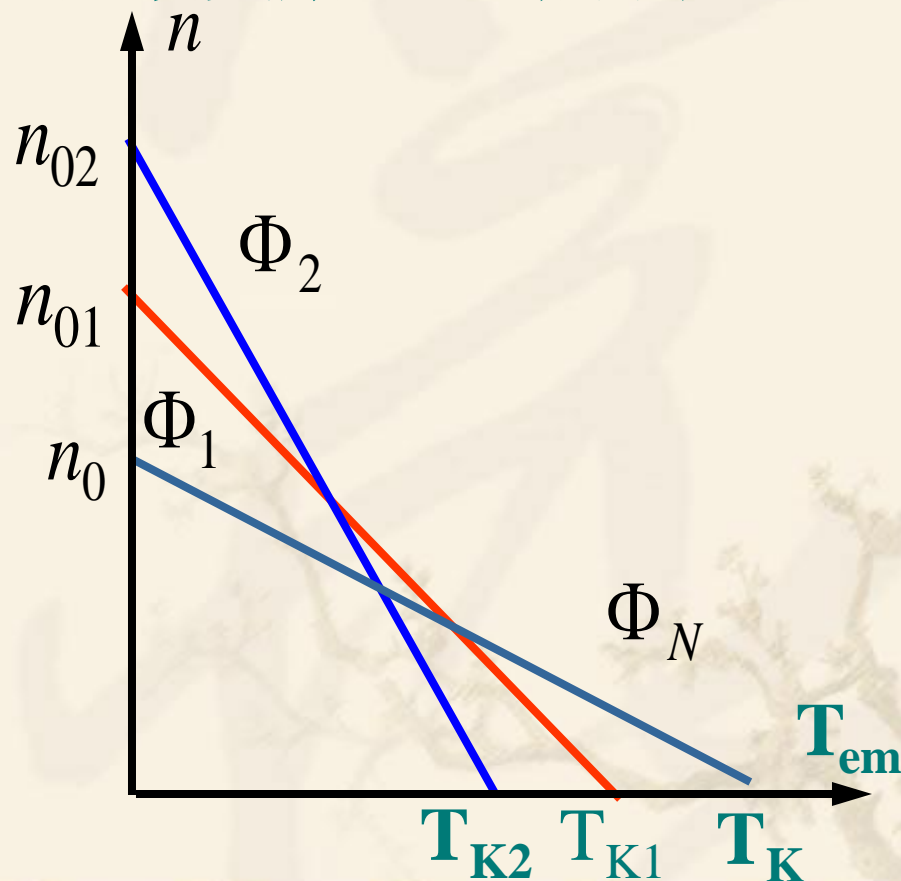


### 3) 减弱励磁磁通时的人为特性

保持  $R = R_a, U = U_N$  不变, 只改变励磁回路调节电阻  $R_{sf}$  的人为特性:

$$n = \frac{U_N}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_{em}$$

特点: (1) 弱磁,  $n_0$  增大;  
(2) 弱磁,  $\beta$  增大







## 三、机械特性的求取

**1.固有机机械特性**（已知： $P_N, U_N, I_N, n_N$ ）

求两点：1）理想空载点：

$$(T_{em} = 0, n = n_0)$$

2）额定运行点：

$$(T_{em} = T_N, n = n_N)$$



## 步骤:

1) 估算  $R_a$ : 
$$R_a = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}\right) \frac{U_N I_N - P_N}{I_N^2}$$

2) 计算  $C_e \Phi_N$  和  $C_T \Phi_N$ : 
$$C_e \Phi_N = \frac{U_N I_N - P_N}{n_N}$$

$$C_T \Phi_N = 9.55 C_e \Phi_N$$

3) 计算理想空载点:  $T_{em} = 0, n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N}$

4) 计算额定工作点:  $T_N = C_T \Phi_N I_N, n = n_N$



## 2、人为机械特性的求取

在固有机机械特性方程  $n = n_0 - \beta T_{em}$  的基础上，  
根据人为特性所对应的参数 或  $R_s$  或  $U$  变化  
重新计算 和  $\beta$  然后得 ( )、 $\alpha n_0$  )。  
 $T_N, n$

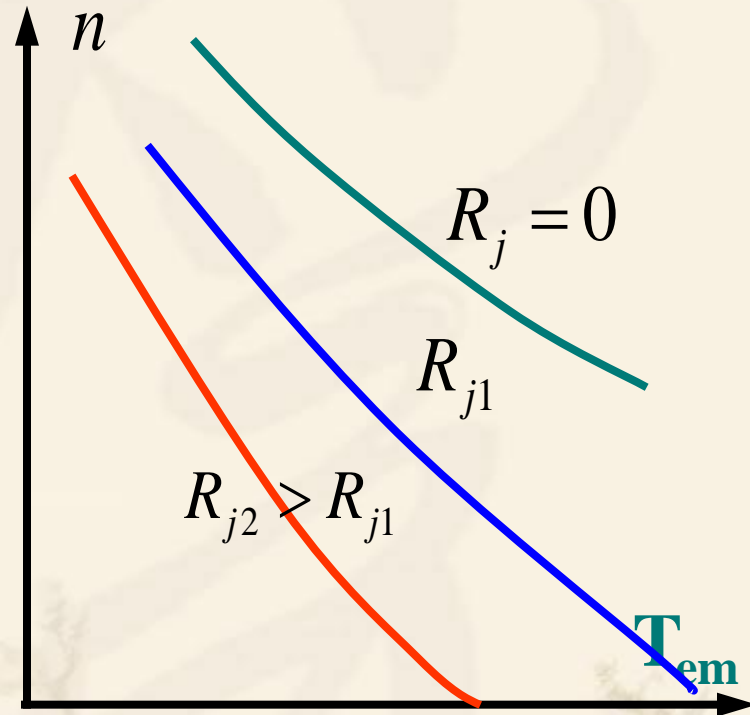
## 四、串励直流电动机的机械特性

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_j}{C_e \Phi} I_a \quad \Phi = k_f I_a$$

$$T_{em} = C_T \Phi^2 / k_f$$

$$\Phi = \sqrt{\frac{k_f}{C_T}} \sqrt{T_{em}}$$

$$n = \frac{U}{C_e \sqrt{\frac{k_f}{C_T}} \sqrt{T_{em}}} - \frac{R_a + R_j}{C_e k_f} = \frac{C_1 U}{\sqrt{T_{em}}} - C_2 (R_a + R_j)$$





## 2.6.2 直流电动机的启动

启动：电机接上电源从静止状态转动起来到达稳态运行，这就是电动机的启动过程。

启动条件：1、启动转矩要足够大

2、启动电流不要太大，

注意：因为在启动时， $n=0$ ,反电动势 $E_a=0$



# 1.直接起动

**直接起动** 起动电流为：

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_a}$$

可见，这种方法下的起动电流很大，因此，除了小容量的电动机可采用直接加电压起动的方法外，一般直流电动机都不采用这种方法。

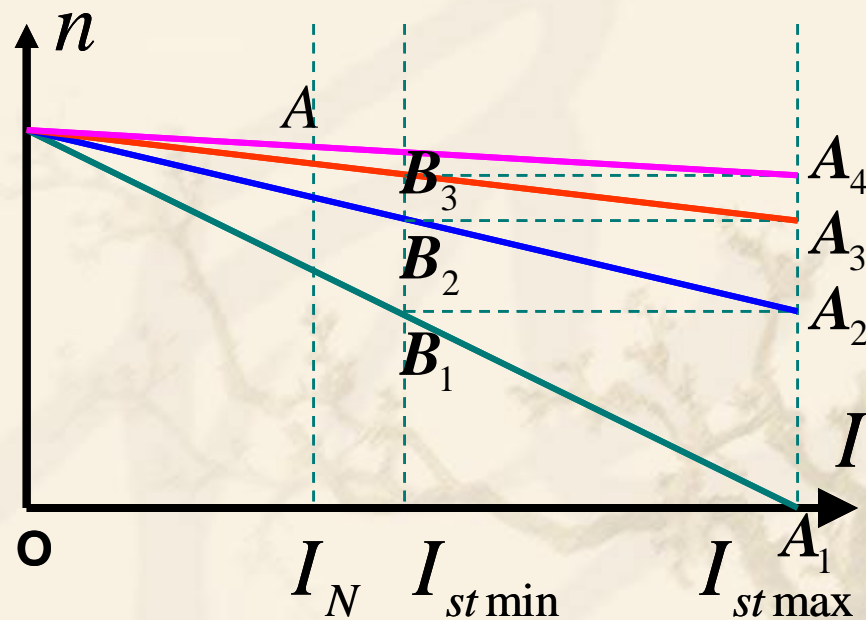
## 2.电枢回路串电阻启动

$$I_{st} = \frac{U_N}{R_a + R_{st}}$$

我们在电枢回路中串入电阻  $R_{st}$ ，可减小启动电流，当启动转矩大于负载转矩，电动机开始转动，此

时  $E_a \neq 0$ ，则 
$$I_{st} = \frac{U_N - E_a}{R_a + R_{st}}$$

随着转速的升高，反电动势不断增大，启动电流继续减小，但是，同时启动转矩也在减小，所以为了在整个启动过程中保持一定的启动转矩，加速电动机的启动过程，采用将启动电阻一段一段逐步切除。





### 3.降低电枢电压起动

$$I_{st} = \frac{U}{R_a}$$

这种方法在起动过程中不会有大量的能量消耗。串励与复励直流电动机的起动方法基本上与并励直流电动机一样，采用串电阻的方法以减小起动电流。但特别值得注意的是串励电动机绝对不允许在空载下起动，否则电机的转速将达到危险的高速，电机会因此而损坏。



## 2.6.3 他励直流电动机的调速

由机械特性方程：

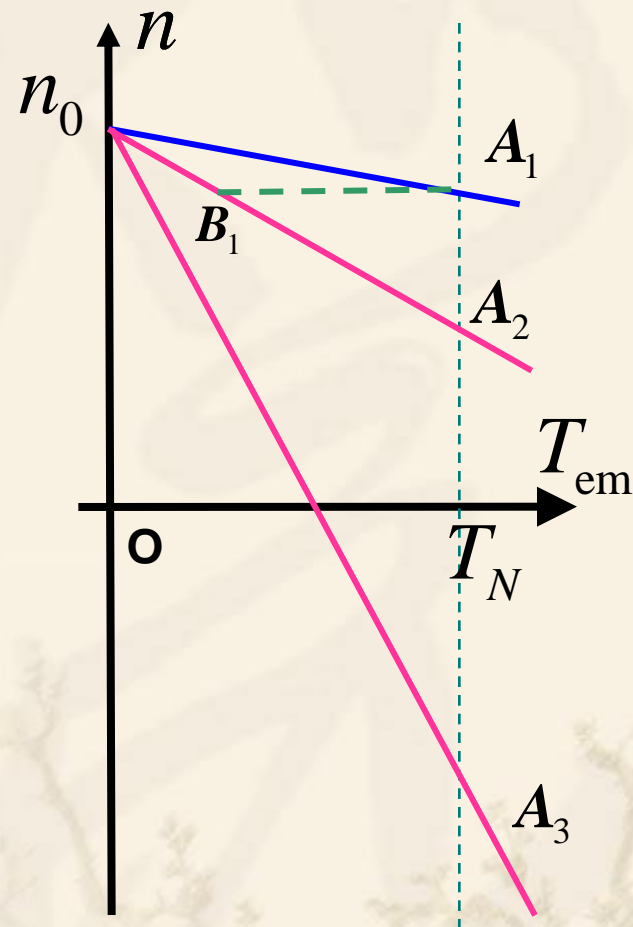
$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R}{C_e C_T \Phi^2} T$$

可知，他励直流电动机有3种方法可以调速：

- (1) 改变电枢电压；
- (2) 改变励磁电流，即改变磁通；
- (3) 电枢回路串入调节电阻。

# 1.电枢回路串电阻调速

电枢回路串联电阻越大，机械特性的斜率越大，因此在负载转矩恒定时，即为常数，增大电阻，可以降低电动机的转速



## 调速过程:

原来未串阻时，工作在A1点

电枢串入电阻时， $n$ 来不及突变，由A1点到B1点

电枢电流下降，电磁转矩下降，使转速 $n$ 下降

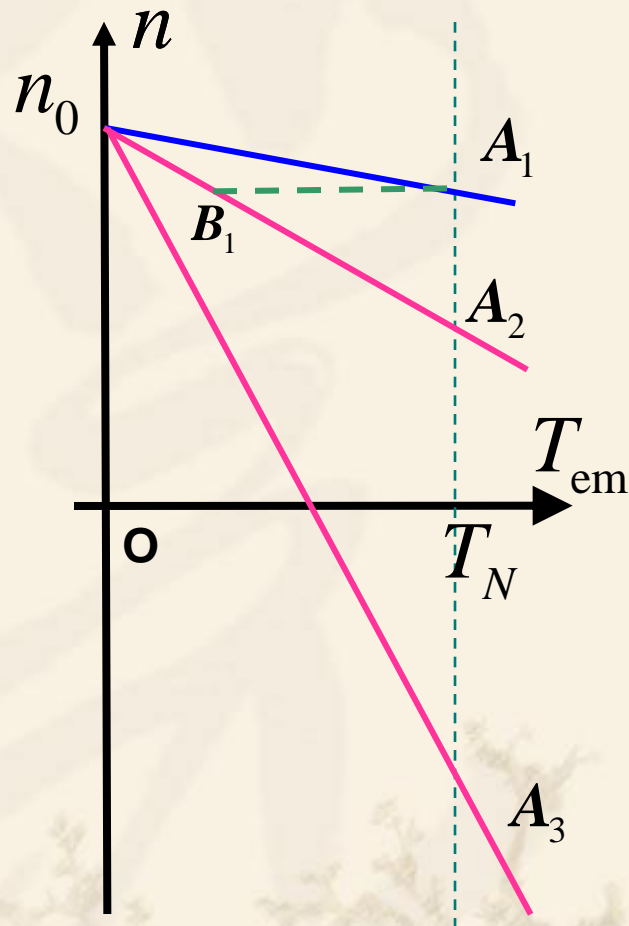
直至稳定运行在A2点。



**优点：**设备简单，操作方便。

**缺点：**属有级调速，轻载几乎没有调节作用，低速时电能损耗大，接入电阻后特性变软，负载变化时转速变化大（动态精度差）只能下调。

若是位能性负载，串入较大的电阻，可以让电动机反转（倒拉反转）。此种调速方法一般用于调速性能要求不高的设备上，如电车，吊车，起重机等。



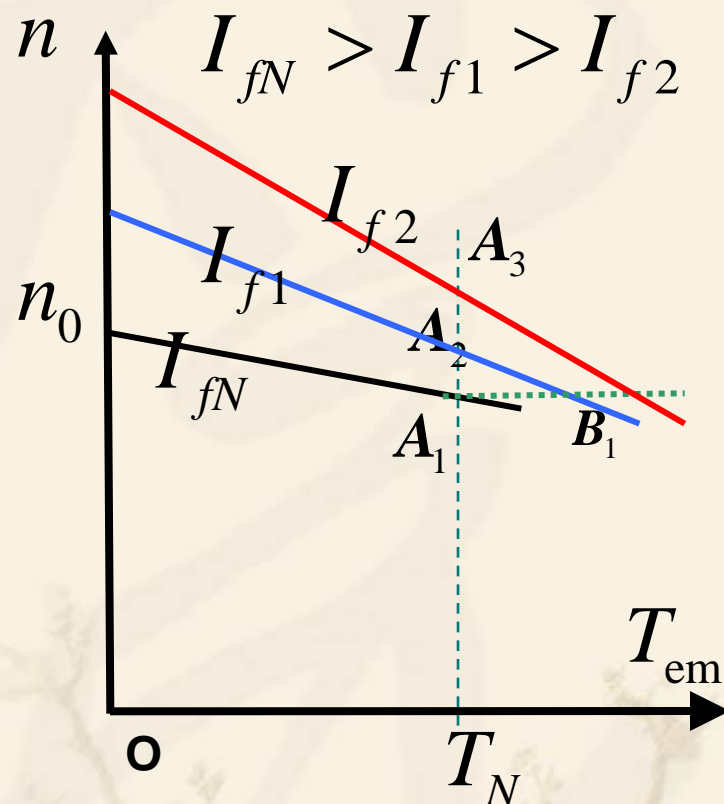


## 2. 弱磁调速

改变 $\Phi$ 的调速，增大 $\Phi$ 可能性不大，因电机磁路设计在饱和段。所以只有减弱磁通。可在励磁回路中串阻或降低励磁电压来实现。

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e = n_0 - \beta T_{em}$$

$$\Phi \downarrow \Rightarrow n_0 = \frac{U}{C_e \Phi} \uparrow, \beta = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} \uparrow$$

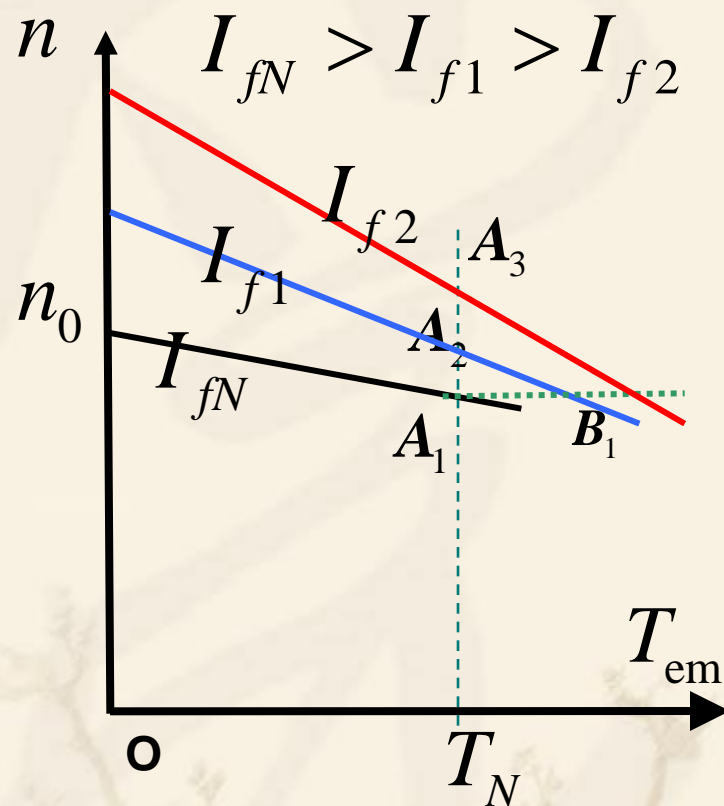


但 $n_0$ 比 $\beta T_{em}$ 增加快，一般情况下 $\Phi$ 下调，转速上升。



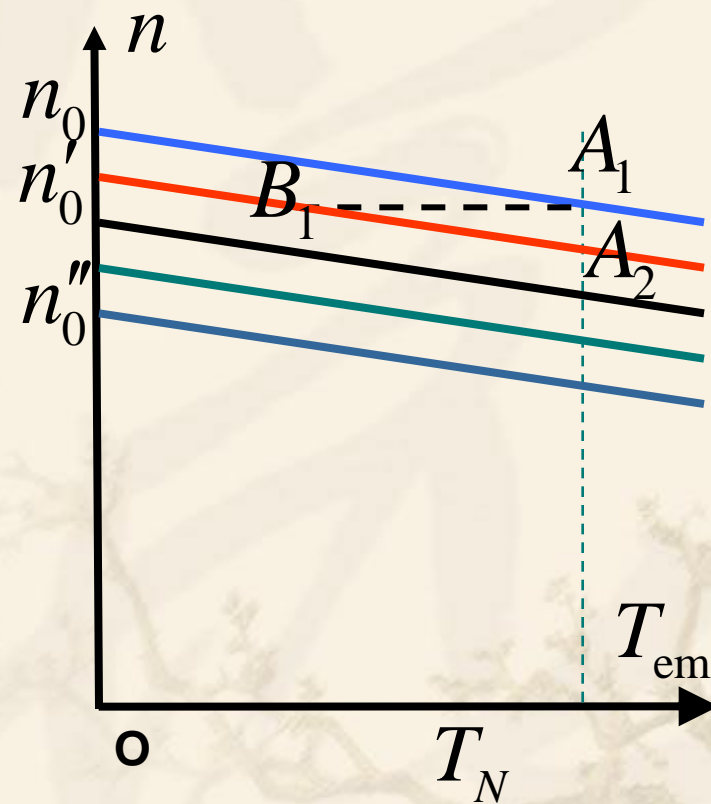
**缺点：** 调速范围小，只能上调，磁通越弱， $I_a$ 越大，使换向变坏。

**优点：** 设备简单，控制方便。  
调速平滑，效率几乎不变，调节电阻上功率损耗不大。



### 3. 降低电枢电压调速

因为电机在正常工作时，电枢电压不能超过额定电压，所以，采用向下调速。很显然，在这里，只改变了 $n_0$ ，所以我们将得到一系列平行与固有特性的曲线。



## 调速过程：

原来未串阻时，工作在A1点



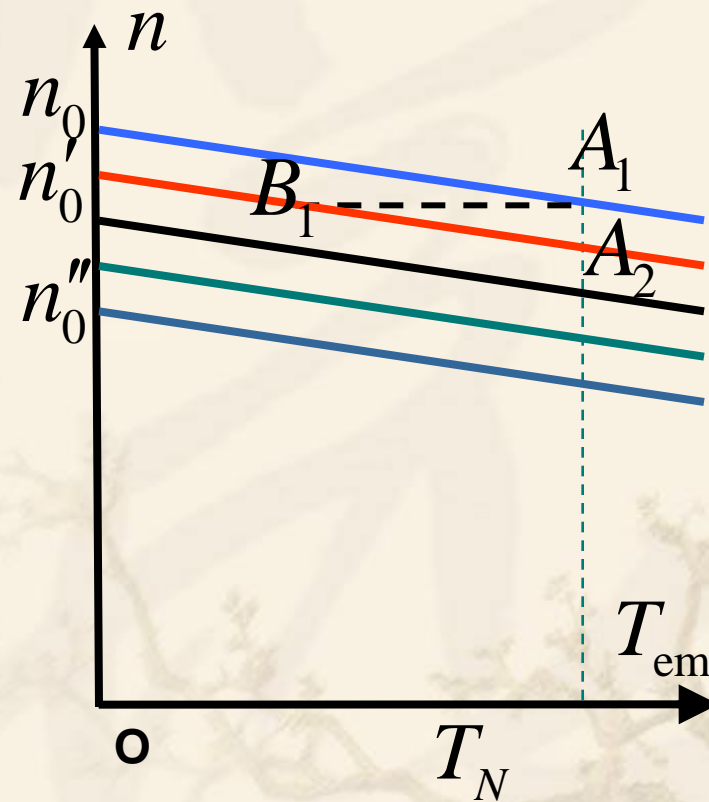
电枢电压下降时， $n$ 来不及突变，由A1点到B1点



电枢电流下降，电磁转矩下降，使转速 $n$ 下降



直至稳定运行在A2点。







**特点：**改变电枢电压调节转速的方法具有较好的调速性能。由于调电压后，机械特性的“硬度”不变，因此有较好的转速稳定性，调速范围较大，同时便于控制，可以做到无级平滑调速，损耗较小。在实际工程当中，常常采用这种方法。

**缺点：**转速只能由额定电压对应的速度向低调。此外，应用这种方法时，电枢回路需要一个专门的可调压电源，过去用直流发电机-直流电动机系统实现，由于电力电子技术的发展，目前一般均采用可控硅调压设备一直流电动机系统来实现。



直流电动机上述三种调速方法中，改变电枢电压和电枢回路串电阻调速属于恒转矩调速，而弱磁调速属于恒功率调速。

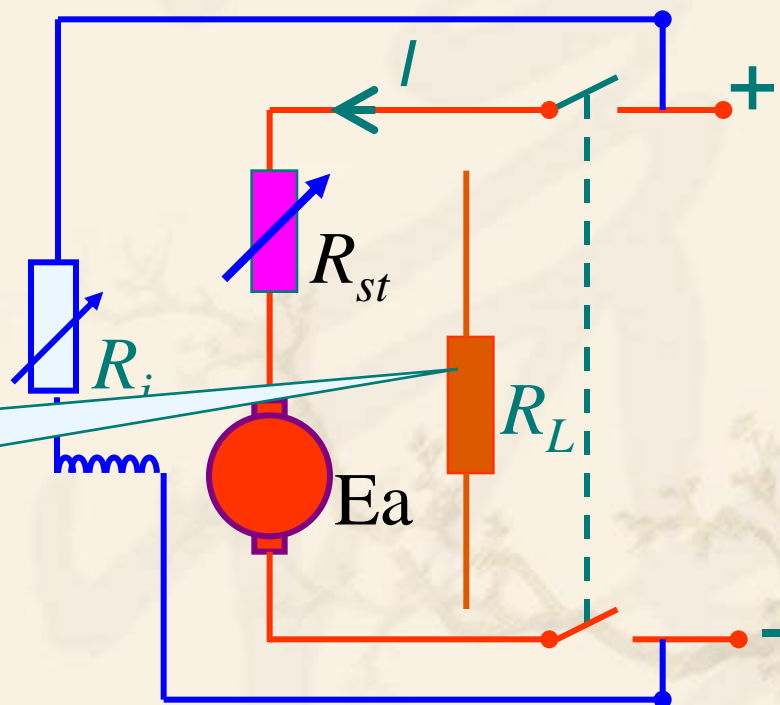


## 2.6.4 直流电动机的制动

在生产过程中，经常需要采取一些措施使电动机尽快停转，或者限制势能性负载在某一转速下稳定运转，这就是电动机的制动问题。实现制动既可采用机械的方法或电气的方法。

### 1. 能耗制动：

电枢回路接至  
负载电阻 $R_L$



电动机的能耗制动



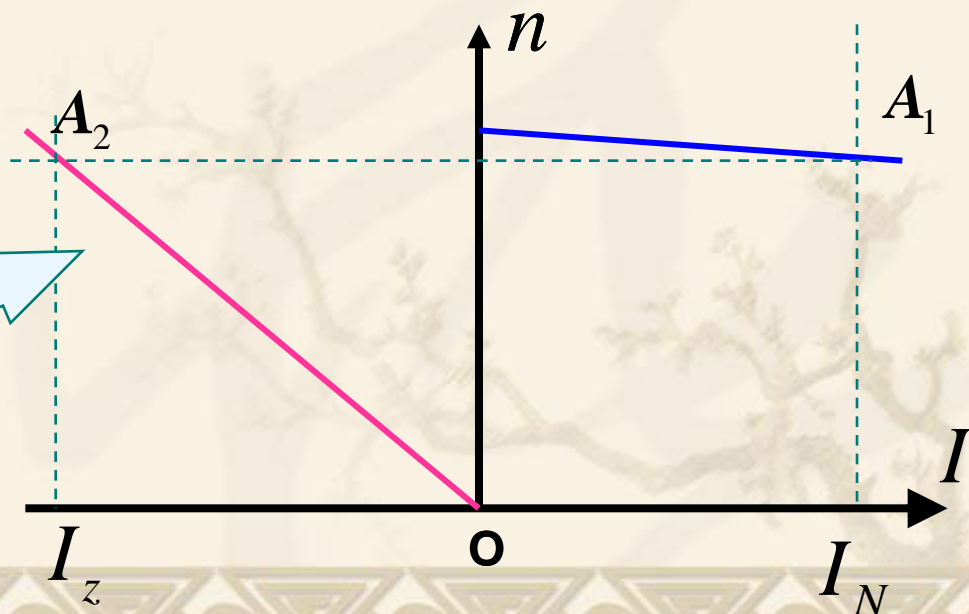
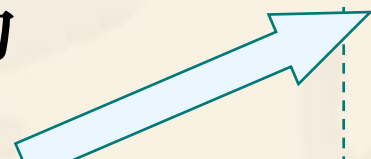
制动时，电动机的电能不在供向电网，而是在电阻上以电阻压降的形式进行消耗，这样一来使的电机的转速迅速下降。这时电机实际处于发电机运行状态，将转动部分的动能转换成电能消耗在电阻和电枢回路的电阻上，所以称为能耗制动。

机械特性分析：

$$U = 0, \Phi = \Phi_N$$

机械特性方程式为

$$n = -\frac{R_a + R}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$







结果分析：这种方法所串入的电阻越小，耗制动开始瞬间的制动转矩和电枢电流就越大，而电流太大，会造成换向上的困难，因此能耗制动过程中电枢电流有个上限，即电动机允许的最大电流。由可以计算出能耗制动过程电枢回路中串入制动电阻的最小值：

$$R_{\min} = \frac{E_a}{I_{a \max}} - R_a$$

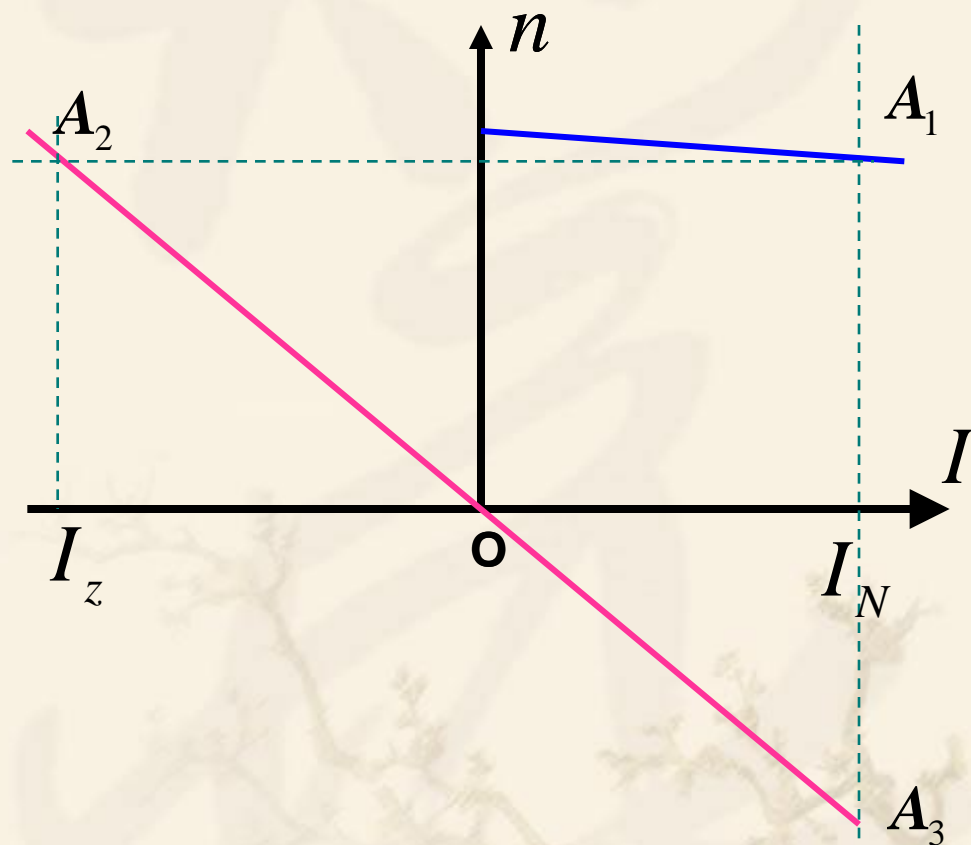
这种制动方法在转速较高时制动作用较大，随着转速下降，制动作用也随之减小，在低速时可配合使用机械制动装置，使系统迅速停转。



## 能耗制动运行：

他励直流电动机拖动势能性负载运行，在达到上述零点时（电磁转矩为零），由于负载转矩不为零，结果，在负载转矩的作用下，电机开始反转，如图随着转速的升高，

$E_a, I_a, T$  均逐渐增大，最后和负载转矩相等时稳定运行，这种过程叫做能耗制动运行。



## 2.电压反接制动

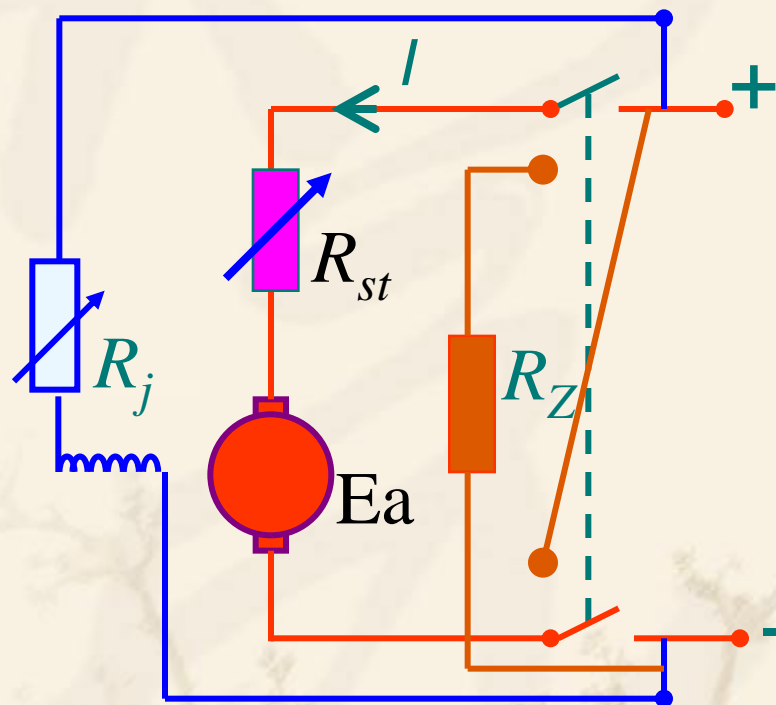
### 反接制动过程分析：

如图所示，电压反接制动是将正在正向运行的他励直流电动机电枢回路的电压突然反接，电枢电流也将反向，主磁通不变，则电磁转矩反向，产生制动转矩。

### 机械特性分析；

反接前

$$I_a = \frac{U_N - E_a}{R_a}$$



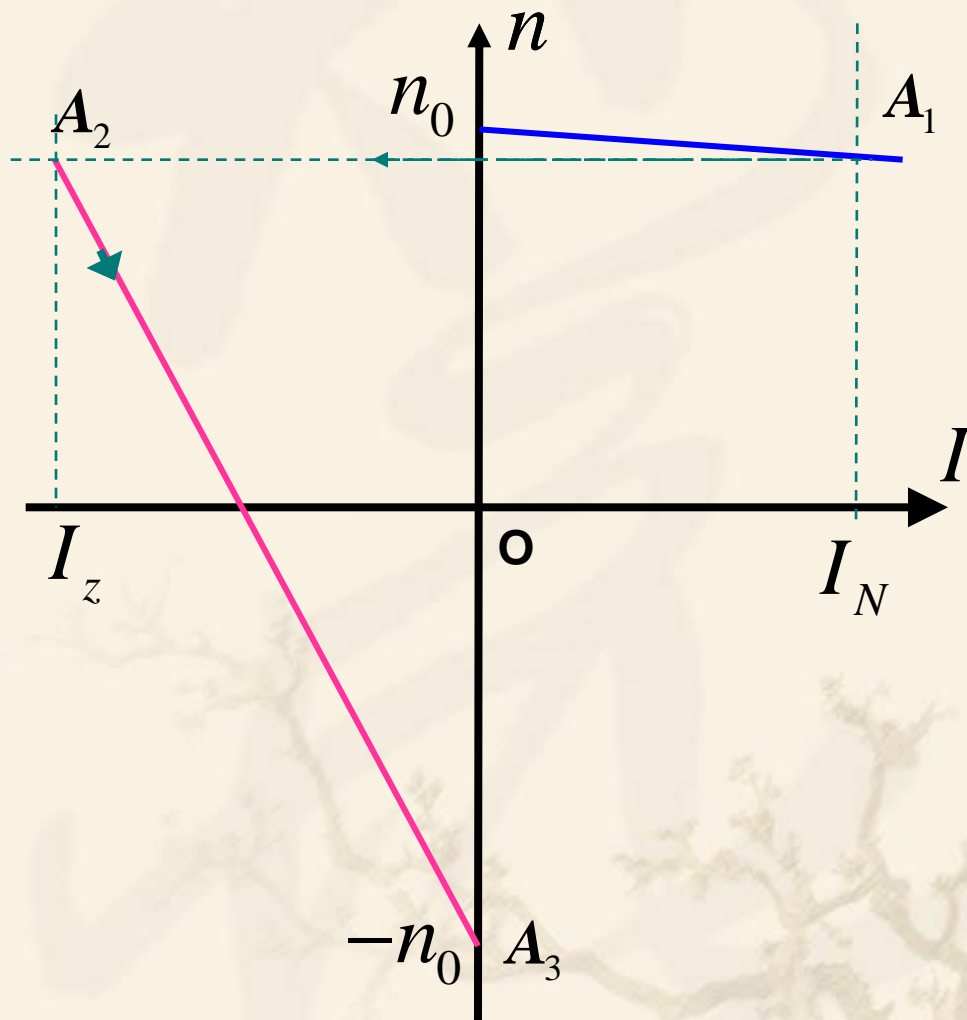
电动机的反接制动



反接后： $U = -U_N$

$$I'_a = -\frac{U_N + E_a}{R_a}$$

因此反接后电流的数值将非常大，为了限制电枢电流，所以反接时必须在电枢回路串入一个足够大的限流电阻。



$$R_{\min} = \frac{U_N + E_a}{I_{a \max}} - R_a$$

电压反接制动时，

$$U = -U_N \quad \Phi = \Phi_N$$

电枢回路的电阻为： $R_a + R$   
电动机的机械特性方程式为：

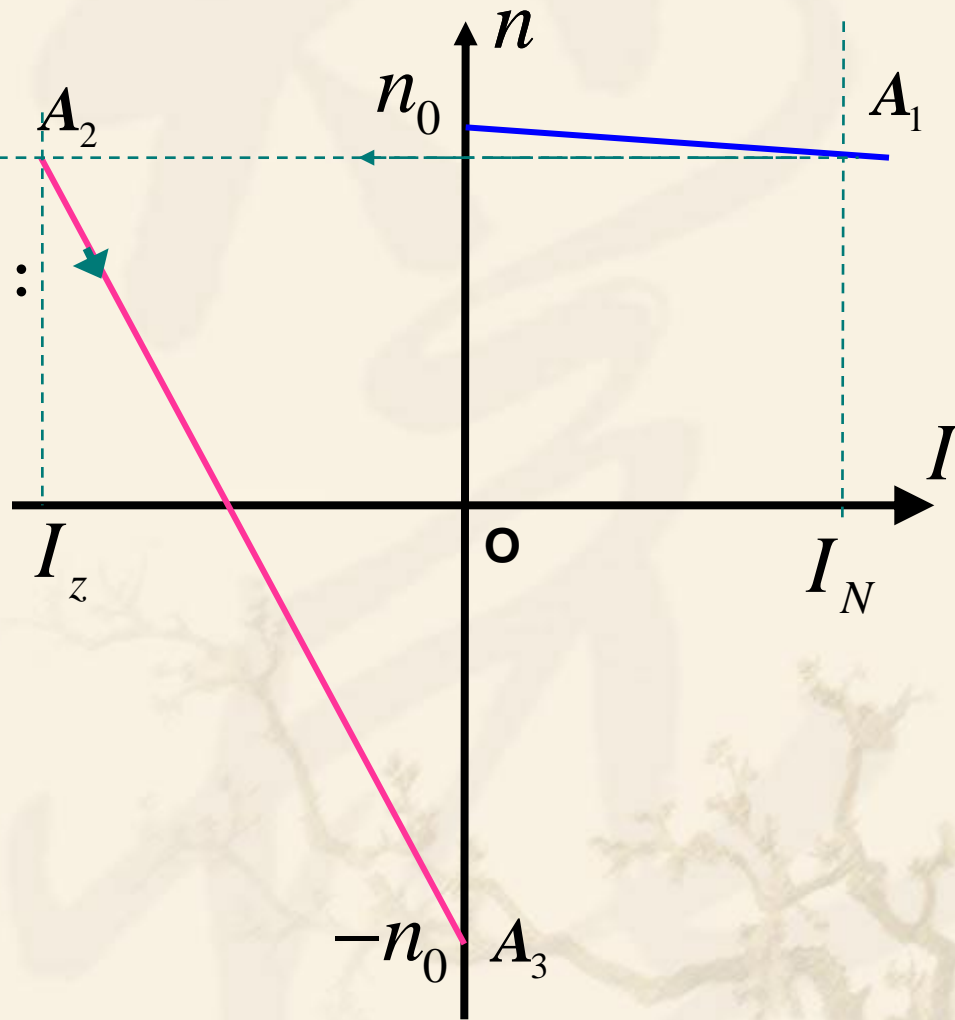
$$n = \frac{-U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a + R}{C_e C_T \Phi_N^2} T$$

其对应的曲线为过 $-n_0$ 点，

斜率为

$$-\frac{R_a + R}{C_e C_T \Phi_N^2}$$

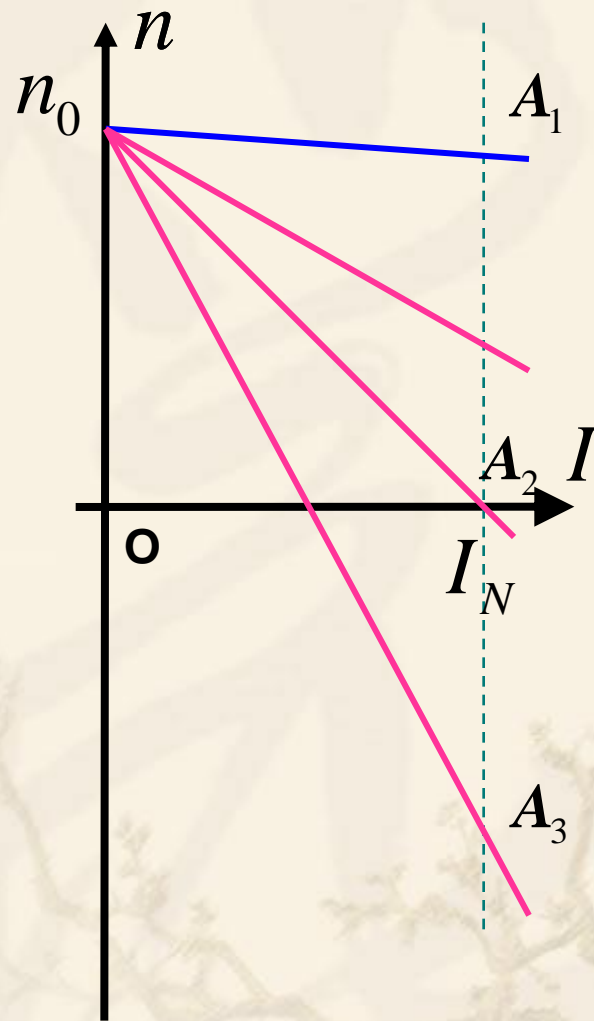
的直线。





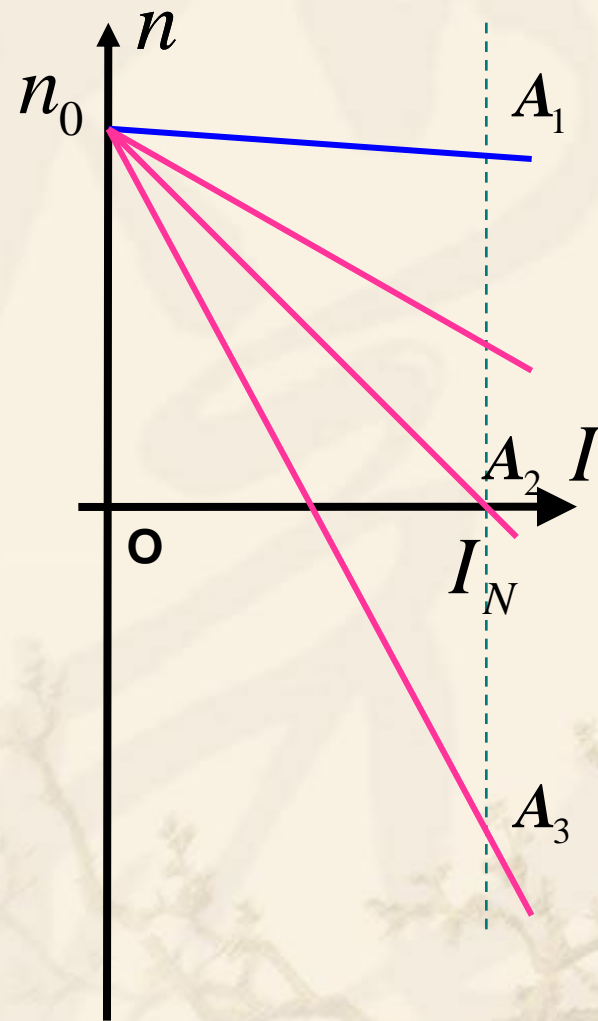
### 3. 倒拉反转制动运行

他励直流电动机拖动位能性恒转矩负载运行，电枢回路串入电阻，将引起转速下降，串的电阻越大，转速下降越多。如果电阻大到一定程度，将使电动机的机械特性和负载的机械特性的交点出现在第IV象限，如图所示，这时电动机接线未变，转速反向。是一种制动运行状态，称为倒拉反转制动运行。



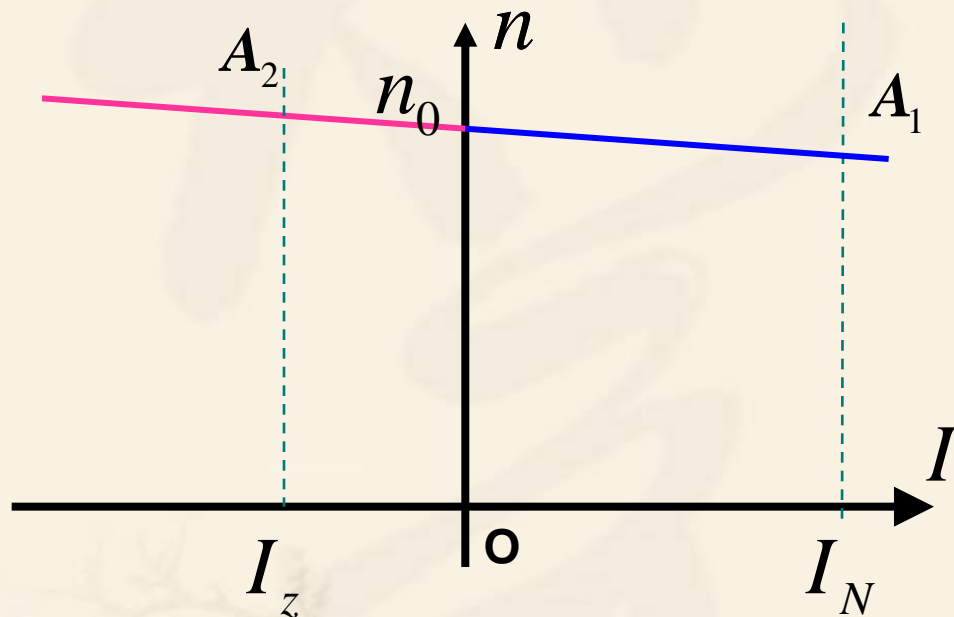


倒拉反转制动运行常用于起重设备低速下放重物的场合。在这种运行方式中，电动机的电磁转矩起了制动作用，限制了重物下降的速度。改变的大小，即可改变机械特性的交点，使重物以不同的稳定速度下降。



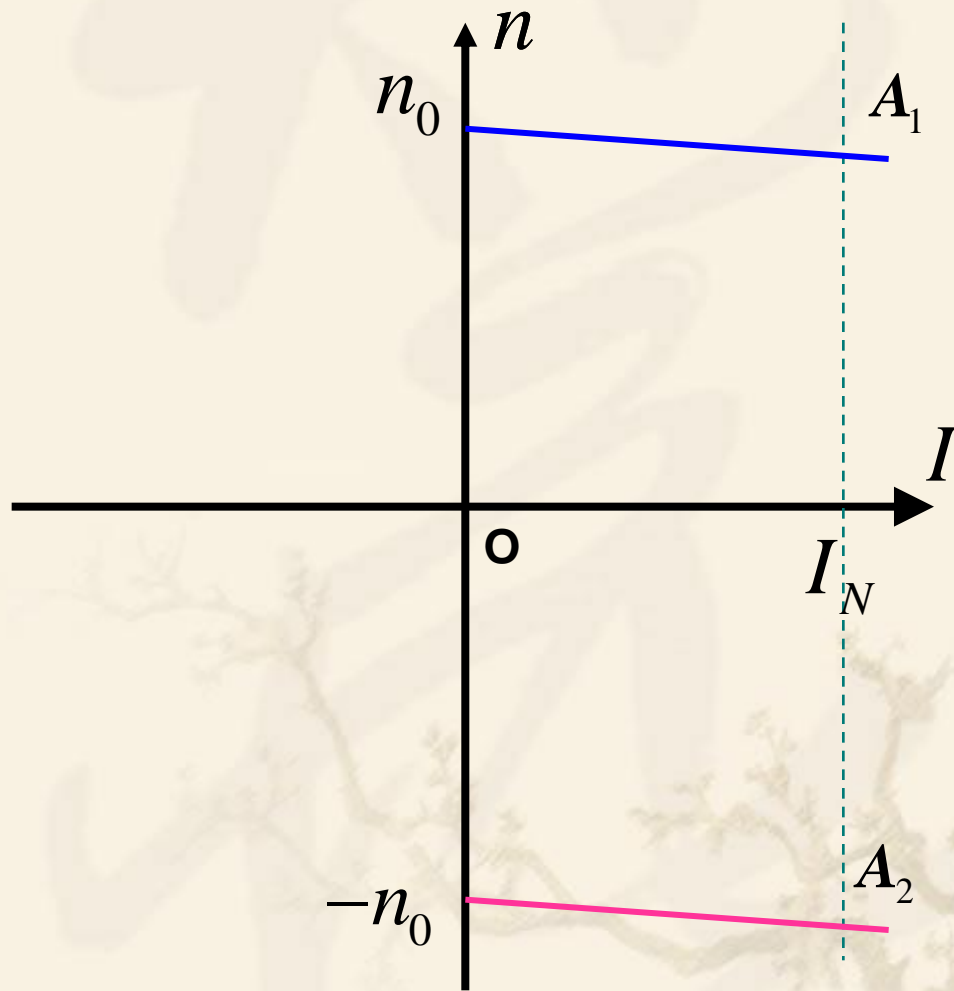
## 4. 回馈制动

**正向回馈制动：**他励直流电动机拖动负载运行，电机将系统具有的动能反馈回电网，且电机仍为正向转动，称之为正向回馈制动。如图  $A_2$  点





**反向回馈制动：**他励直流电动机拖动位能性恒转矩负载运行，采用电压反接制动，电机将系统具有的动能反馈回电网，电机为反向转动，称之为反向回馈制动。如图A<sub>2</sub>点。



**例题2-** 一台并励直流电动机， $P_N=17\text{kW}$ ， $U_N=220\text{V}$ ， $n_N=3000\text{r/min}$ ，电枢回路总电阻 $R_a=0.114\Omega$ ，励磁回路电阻 $R_f=181.5\Omega$ ，忽略电枢反应的影响，求：

- (1) 电动机的额定输出转矩；
- (2) 额定负载时的电磁转矩；
- (3) 额定负载时的效率；
- (4) 在理想空载时( $I_a=0$ )的转速；
- (5) 当电枢回路中串入一电阻 $R=0.15\Omega$ 时，在额定转矩下的转速。

**解：**①额定输出转矩  $T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{17}{3000} = 54.1\text{Nm}$

②额定负载时电磁转矩：  
励磁电流  $I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{220}{181.5} = 1.21\text{A}$

电枢电流  $I_a = I_N - I_f = 88.9 - 1.21 = 87.7\text{A}$

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - I_a R_a}{n_N} = \frac{220 - 87.7 \times 0.114}{3000} = 0.07$$

$$T_{emN} = C_T \Phi_N I_a = 9.55 C_e \Phi_N I_a = 9.55 \times 0.07 \times 87.7 = 58.63\text{Nm}$$

**例题2-** 一台并励直流电动机,  $P_N=17\text{kW}$ ,  $U_N=220\text{V}$ ,  $n_N=3000\text{r/min}$ , 电枢回路总电阻  $R_a=0.114\Omega$ , 励磁回路电阻  $R_f=181.5\Omega$ , 忽略电枢反应的影响, 求:

- (1) 电动机的额定输出转矩; (2) 额定负载时的电磁转矩;  
(3) 额定负载时的效率; (4) 在理想空载时( $I_a=0$ )的转速;  
(5) 当电枢回路中串入一电阻  $R=0.15\Omega$  时, 在额定转矩下的转速。

③额定负载时效率  $\eta = \frac{P_N}{P_1} = \frac{P_N}{U_N I_N} = \frac{17000}{220 \times 88.9} = 0.869$

④理想空载时的转速  $n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} = \frac{220}{0.07} = 3143\text{r/min}$

⑤当电枢回路串入  $R=0.15\Omega$ , 在  $T_N$  时转速

$$n = \frac{U_N - I_a(R_a + R)}{C_e \Phi_N} = \frac{220 - 87.7(0.114 + 0.15)}{0.07} = 2812\text{r/min}$$



**例题2-11** 一台并励直流电动机,  $P_N=10\text{kW}$ ,  $U_N=220\text{V}$ ,  $n_N=1000\text{r/min}$ , 电枢回路电阻  $r_a=0.283\Omega$ ,  $2\Delta U_b=2\text{V}$ ,  $\eta_N=83\%$ ,  $I_{fN}=1.7\text{A}$ , 带恒转矩负载, 现采用电枢回路串电阻的调速方式, 将转速降到  $500\text{r/min}$ , 求:  
1) 电枢电流  $I_a$ ; 2) 电枢回路调节电阻  $R_j$ ; 3) 调速后电机的效率;

**解:** ①额定负载时的输入功率  $P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{10}{0.83} = 12.05\text{kW}$

②电动机的额定电流  $I_N = \frac{P_1}{U_N} = \frac{12050}{220} = 54.77\text{A}$

电枢电流  $I_a = I_N - I_{fN} = 54.77 - 1.7 = 53.07\text{A}$

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - 2\Delta U_b - I_a R_a}{n_N} = \frac{220 - 53.07 \times 0.283 - 2}{1000} = 0.20298$$

稳定后电枢电流不变,

$$R_j = \frac{U_N - 2\Delta U_b - C_e \Phi_N n}{I_a} - R_a = \frac{220 - 2 - 0.20298 \times 500}{53.07} - 0.283 = 1.912\Omega$$

负载转矩不变, 则  $P_2 = P_N \frac{n}{n_N} = 5\text{kW}$   $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{5}{12.05} = 41.5\%$

**例题2-12** 一台并励直流电动机,  $P_N=10\text{kW}$ ,  $U_N=220\text{V}$ ,  $n_N=1000\text{r/min}$ , 电枢回路电阻  $r_a=0.283\Omega$ ,  $2\Delta U_b=2\text{V}$ ,  $\eta_N=83\%$ ,  $I_{fN}=1.7\text{A}$ , 带恒转矩负载, 采用电枢回路串电阻的调速方式, 设串入的电阻为  $1.0\Omega$ 。

- 1) 计算串入电阻瞬间的电枢电动势、电枢电流和电磁转矩;
- 2) 电动机稳定后的转速;

**解:** ①由上例题可知:  $C_e \Phi_N = 0.20298$ ,  $E_{aN} = 202.98\text{V}$ ,  $I_{aN} = 53.07\text{A}$

串入电阻瞬间, 转子转速不变, 则电动机的电动势不变,

$$E_a = E_{aN} = 202.98\text{V}$$

电枢电流 
$$I_a = \frac{U_N - 2\Delta U_b - E_a}{R_a + R_j} = \frac{220 - 2 - 202.98}{1.283} = 11.71\text{A}$$

电磁转矩:

$$T_{\text{em}} = C_T \Phi I_a = 9.55 C_E \Phi I_a = 9.55 \times 0.20298 \times 11.71 = 22.69\text{N} \cdot \text{m}$$

②稳定后的转速:

$$n = \frac{U - 2\Delta U_b - I_{aN}(R_a + R_j)}{C_E \Phi} = \frac{220 - 2 - 53.07 \times 1.283}{0.20298} = 738.55\text{r/min}$$

**例题2-13** 一台并励直流电动机， $P_N=10\text{kW}$ ,  $U_N=220\text{V}$ ,  $n_N=1000\text{r/min}$ , 电枢回路电阻  $r_a=0.283\Omega$ ,  $2\Delta U_b=2\text{V}$ ,  $\eta_N=83\%$ ,  $I_{fN}=1.7\text{A}$ , 带恒转矩负载，采用弱磁调速方式，设磁通减少20%。

1) 开始瞬间的电枢电流；2) 稳定后的电枢电流和转速；

**解:** ①由上例题可知:  $C_e \Phi_N = 0.20298$ ,  $E_{aN} = 202.98\text{V}$ ,  $I_{aN} = 53.07\text{A}$

开始瞬间，转子转速不变，则电枢电流

$$I_a = \frac{U_N - 2\Delta U_b - C_e \Phi n}{R_a} = \frac{220 - 2 - 0.20298 * 0.8 * 1000}{0.283} = 196.52\text{A}$$

$T_L$  恒定，则电磁转矩不变，稳定后的电枢电流：

$$I_a = \frac{\Phi_N}{\Phi} I_{aN} = \frac{53.07}{0.8} = 66.34\text{A}$$

②稳定后的转速：

$$n = \frac{U - 2\Delta U_b - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{220 - 2 - 66.34 * 0.283}{0.20298 * 0.8} = 1226.9\text{r/min}$$

**例题2-14** 一台它励直流电动机， $P_N=10\text{kW}$ ,  $U_N=220\text{V}$ ,  $n_N=1000\text{r/min}$ , 电枢回路电阻  $r_a=0.283\Omega$ ,  $2\Delta U_b=2\text{V}$ ,  $\eta_N=85.6\%$ ,  $I_{fN}=1.7\text{A}$ , 带恒转矩负载，现采用降低电枢电压的调速方式，将转速降到  $500\text{r/min}$ , 求：  
1) 电枢电流  $I_a$ ；2) 电枢电压；3) 调速后电机的效率；

**解：**①额定负载时的输入功率  $P_1 = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{10}{0.856} = 11.6754\text{kW}$

②电动机的额定电流  $I_N = \frac{P_1}{U_N} = \frac{11675.4}{220} = 53.07\text{A}$

电枢电流  $I_{aN} = I_N = 53.07\text{A}$

$$C_e \Phi_N = \frac{U_N - 2\Delta U_b - I_a R_a}{n_N} = \frac{220 - 53.07 \times 0.283 - 2}{1000} = 0.20298$$

稳定后电枢电流不变，

$$U = C_e \Phi_N n + 2\Delta U_b + R_a I_a = 0.20298 \times 500 + 2 + 53.07 \times 0.283 = 118.5\text{V}$$

负载转矩不变，则  $P_2 = P_N \frac{n}{n_N} = 5\text{kW}$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{5}{6.289} = 79.5\%$$

输入功率： $P_1 = 118.5 \times 53.07 = 6.289\text{kW}$