一. 直流电机的用途及基本工作原理

二. 直流电机的主要结构和型号

三. 直流电机的磁路、空载时的气隙磁密与空载磁化特性

四. 直流电机的电枢绕组

五. 电枢电动势与电磁转矩

六. 直流发电机

七. 直流电动机运行原理

八. 他励直流电动机的机械特性

九. 串励和复励直流电动机

一〇. 直流电机的换向

六. 直流发电机

本节学习要点：

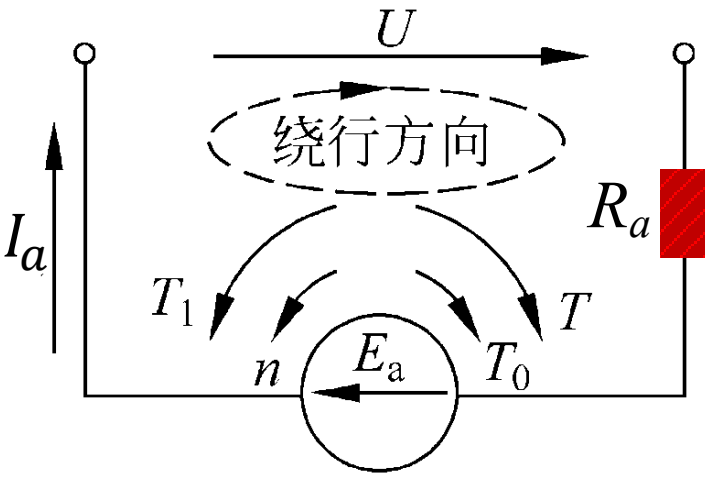
1. 理解和掌握直流发电机的**基本方程式**和**功率关系**（重点内容）

1、直流发电机稳态运行时的基本方程式

☞ 电动势平衡方程式

电枢回路： $E_a = U + I_a R_a$

励磁回路： $U_f = I_f R_f$

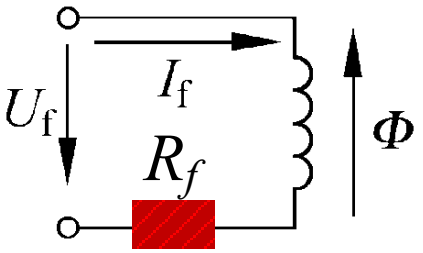


☞ 转矩平衡方程式

恒速旋转时：

$$T_1 = T + T_0$$

拖动转矩　　电磁转矩　　空载转矩



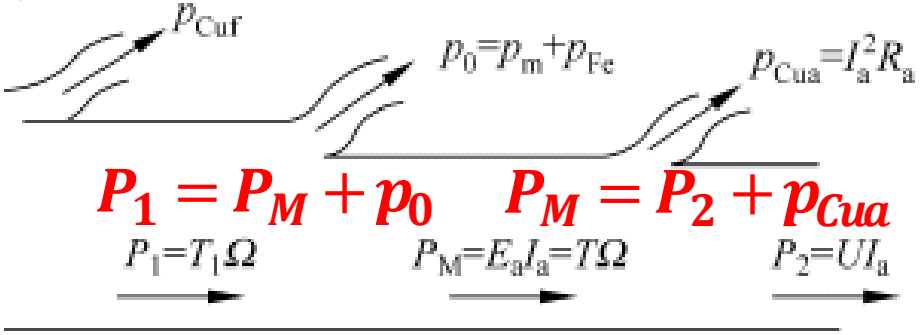
发电机惯例

2、他励直流发电机的功率关系

原动机输入的机械功率：$P_1 = T_1\Omega$

电磁功率：$P_M = T\Omega = E_a I_a$

机械功率向电功率转换



$P_1 = P_M + p_0$　　$P_M = P_2 + p_{Cua}$

发电机输给负载电功率：$P_2 = UI_a = P_N$

他励直流发电机功率流程

铁损耗：p_{Fe}

机械摩擦损耗：p_m

空载损耗：$p_0 = T_0\Omega$

电枢回路总铜损耗：$p_{Cua} = I_a^2 R_a$

励磁损耗：$p_{Cuf} = I_f^2 R_f$

附加损耗：p_s

总损耗：并励$\sum p$ 包含 p_{Cuf}

$$\sum p = p_{Cua} + p_{Fe} + p_m + p_s$$

发电机的效率：

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

例题 3-5 一台额定功率20kW并励直流发电机，额定电压230V，额定转速1500r/min，电枢回路总电阻0.156Ω，励磁回路总电阻73.3Ω。已知机械损耗和铁损耗p_m+p_{Fe}=1kW，求：额定负载情况下各绕组的铜损耗、电磁功率、总损耗、输入功率及效率？（工程计算中，令$P_2=P_N$，附加损耗$p_s=0.01P_N$）

解题思路：

1，求$\boldsymbol{p_{Cua}}$，$\boldsymbol{p_{Cuf}}$。已知，R_a，R_f，

先求I_f，再求$I_a = I_N + I_f$

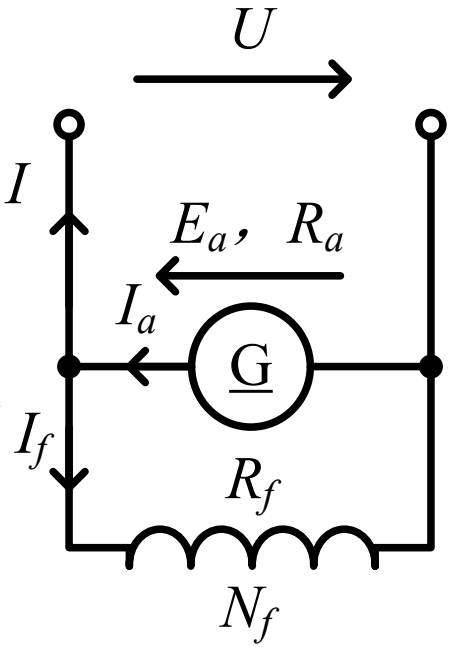
2，求$\boldsymbol{P_M}$，方法一：$\boldsymbol{P_M = P_2 + p_{Cua} + p_{Cuf}}$

方法二：$P_M = E_a I_a$，先求E_a=$U_N + I_a R_a$

3，求$\sum p$，$\sum p = p_{Cua} + p_{Fe} + p_m + p_s$

4，求$\boldsymbol{P_1}$，$\boldsymbol{P_1 = P_2 + \sum p = P_M + p_0}$

5，求η，η=P_2/P_1



解：先计算额定电流：

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{20 \times 10^3}{230} = 86.96\ A$$

励磁电流：

$$I_f = \frac{U_N}{R_f} = \frac{230}{73.3} = 3.14\ A$$

电枢绕组电流：$I_a = I_N + I_f = 86.96 + 3.14 = 90.1\ A$

电枢回路铜损耗：$p_{Cua} = I_a^2 R_a = 90.1^2 \times 0.156 = 1266\ W$

励磁回路铜损耗：$p_{Cuf} = I_f^2 R_f = 3.14^2 \times 73.3 = 723\ W$

解： 电磁功率：

$$P_M = E_a I_a = (U_N + I_a R_a) I_a = (230 + 90.1 \times 90.1) \times 90.1 = 21989\ W$$

$$或 = P_2 + p_{Cua} + p_{Cuf} = 20000 + 1266 + 723 = 21989\ \mathrm{W}$$

总损耗：$\sum p = p_{Cua} + p_{Cuf} + p_{Fe} + p_m + p_s$

$$= 1266 + 723 + 1000 + 0.01 \times 20000 = 3189\ W$$

输入功率：$P_1 = P_2 + \sum p = 20000 + 3189 = 23189\ W$

效率：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{20000}{23189} = 86.25\%$$

一. 直流电机的用途及基本工作原理

二. 直流电机的主要结构和型号

三. 直流电机的磁路、空载时的气隙磁密与空载磁化特性

四. 直流电机的电枢绕组

五. 电枢电动势与电磁转矩

六. 直流发电机

七. 直流电动机运行原理

八. 他励直流电动机的机械特性

九. 串励和复励直流电动机

一〇. 直流电机的换向

七. 直流电动机的运行原理

本节学习要点：

1. 理解和掌握直流电动机的基本方程式和功率关系
2. 理解直流电动机的工作特性

1、他励直流电动机稳态运行的基本方程

☞ 电动势平衡方程式

电枢回路：$U = E_a + I_a R_a$

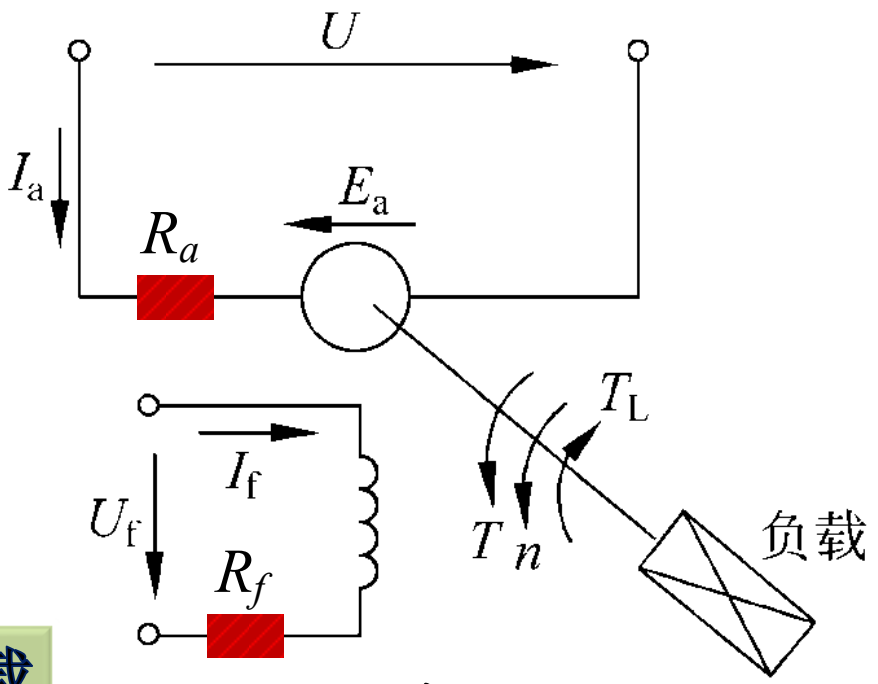
励磁回路：$U_f = I_f R_f$

☞ 转矩平衡方程式

恒速旋转时：

$$T = T_2 + T_0 = T_L$$

电磁转矩　机械负载转矩　空载转矩　总负载转矩



电动机惯例

2、他励直流电动机的功率关系

电源输入的电功率：$P_1 = UI_a$

电磁功率：$P_M = E_a I_a = T\Omega$

电功率向机械功率转换

转轴输出机械功率：$P_2 = T_2\Omega = P_N$

铁损耗：p_{Fe}

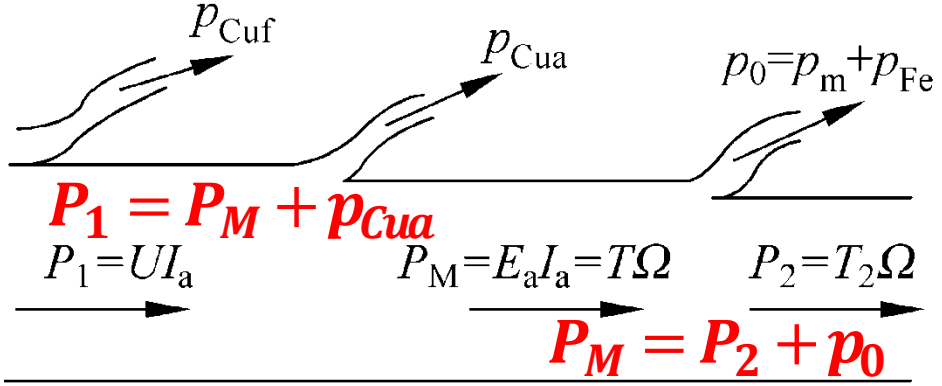
机械摩擦损耗：p_m

空载损耗：$p_0 = T_0\Omega$

电枢回路总铜损耗：$p_{Cua} = I_a^2 R_a$

励磁损耗：$p_{Cuf} = I_f^2 R_f$

附加损耗：p_s



$P_1 = P_M + p_{Cua}$

$P_M = P_2 + p_0$

他励直流电动机功率流程

总损耗：并励$\sum p$包含p_{Cuf}

$$\sum p = p_{Cua} + p_{Fe} + p_m + p_s$$

电动机的效率：

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

例题 3-6 一台四极他励直流电机，电枢采用单波绕组，电枢总导体数为372，电枢回路总电阻0.208Ω。当此电机运行在电源电压220V，电机的转速为1500r/min，气隙每极磁通0.011Wb，此时电机的铁耗p_{Fe}=362W，机械摩擦损耗p_m = 204W（忽略附加损耗）。求：1、该电机运行在发电状态，还是电动状态？2、电磁转矩是多少？3、输入功率和效率各是多少？

解题思路：

1、求E_a，已知p，a，z，n，Φ，先求$C_e=\frac{pz}{60a}$。$E_a=C_e\Phi n$。

2、求T，方法一：由$P_M=E_aI_a=T\Omega$，已知R_a，先求$I_a=\frac{U-E_a}{R_a}$

方法二：$T=C_t\Phi I_a=9.55C_e\Phi I_a$，已知$R_a$，先求$I_a=\frac{U-E_a}{R_a}$

3、求P_1，$P_1=UI_a$

4、求η，先求P_2，$\boldsymbol{P_2=P_M-p_0=P_M-p_{Fe}-p_m}$

解： 1、电枢感应电动势：

$$E_a = \frac{pz}{60a}\Phi n = \frac{2\times 372}{60\times 1}\times 0.011\times 1500 = 204.6\ V$$

$E_a < U$, 电机运行于电动机状态

2、电磁转矩：$I_a = \frac{U-E_a}{R_a} = \frac{220-204.6}{0.208} = 74\ A$

$$T = \frac{P_M}{\Omega} = 9.55\frac{E_a I_a}{n} = 9.55\times\frac{204.6\times 74}{1500} = 96.39\ N\cdot m$$

方法二：$T = C_t\Phi I_a = 9.55 C_e \Phi I_a = 96.39\ N\cdot m$

3、输入功率：$P_1 = UI_a = 220\times 74 = 16.28\ kW$

输出功率：

$$P_2 = P_M - p_{Fe} - p_m = 204.6\times 74 - 362 - 204 = 14.574\ kW$$

4、效率：$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{14574}{162800} = 89.5\%$

例题 3-7 一台并励直流电动机：P_N=96kW，U_N=440V，I_N=255A，I_{fN}= 5A,n_N=500r/min，电枢回路总电阻0.078Ω，忽略电枢反应的影响，求：（1）额定输出转矩（2）在额定电流时的电磁转矩？

解题思路：

1，求T_{2N}，已知P_N, n_N，

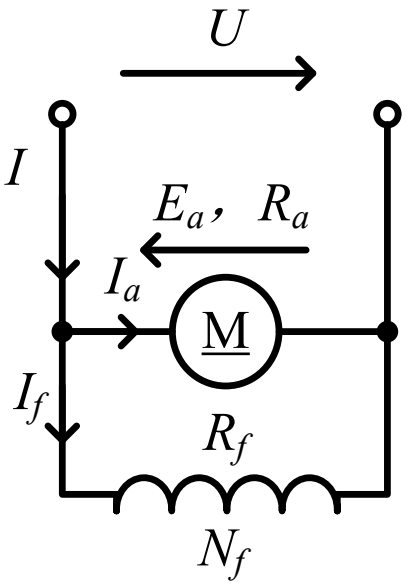
公式：P_N=$T_{2N}\Omega_N = T_{2N}n_N/9.55$

2，求T_N，方法一：$T_N = C_t\Phi_N I_a$，

已知U_N, I_N, I_{fN}, R_a ,先求 $I_a = I_N - I_{fN}$

$$C_e\Phi_N = \frac{U_N - I_a R_a}{n_N}$$

方法二：先求$P_M = E_a I_a = T\Omega$



解：（1）额定输出转矩：

$$T_{2N}=\frac{P_N}{\Omega}=9.55\frac{P_N}{n_N}=9.55\times\frac{96\times10^{3}}{500}=1833.5\ N\cdot m$$

（2）额定电流时的电磁转矩：

$$I_a=I_N-I_{fN}=255-5=250\ A$$

$$P_M=E_aI_a=(U_N-I_aR_a)I_a=(440-250\times0.078\Omega)\times250=105125\,\mathrm{W}$$

$$T_N=\frac{P_M}{\Omega}=9.55\frac{P_M}{n_N}=9.55\times\frac{105125}{500}=2007.9\ N\cdot m$$

另解：

$$C_e\Phi_N=\frac{U_N-I_aR_a}{n_N}=\frac{440-250\times0.078}{500}=0.841$$

$$T_N=C_t\Phi_NI_a=9.55C_e\Phi_NI_a=2007.9\ N\cdot m$$

一. 直流电机的用途及基本工作原理

二. 直流电机的主要结构和型号

三. 直流电机的磁路、空载时的气隙磁密与空载磁化特性

四. 直流电机的电枢绕组

五. 电枢电动势与电磁转矩

六. 直流发电机

七. 直流电动机运行原理

八. 他励直流电动机的机械特性

九. 串励和复励直流电动机

一〇. 直流电机的换向

八. 他励直流电动机的机械特性

本节学习要点：

1. 掌握他励直流电动机机械特性的一般表达式
2. 理解直流电动机的固有机械特性和人为机械特性
3. 掌握根据电机铭牌数据估算机械特性方法

1、机械特性的一般表达式

定义：在一定电压U和一定励磁I_f时，电磁转矩与转速之间的关系。

$$n=\frac{U-I_a(R_a+R)}{C_e\Phi}=\frac{U}{C_e\Phi}-\frac{R_a+R}{C_eC_t\Phi^2}T=n_0-\beta T$$

$$I_a=\frac{T}{C_t\Phi}$$

R表示电枢串联电阻

理想空载转速：$n_0=\frac{U}{C_e\Phi}$

机械特性斜率：$\beta=\frac{R_a+R}{C_eC_t\Phi^2}$

2.1、固有机械特性

定义：当$U=U_N$，$I_f=I_{fN}$，电枢不串电阻R=0时，这种情况下的机械特性，称为固有机械特性。

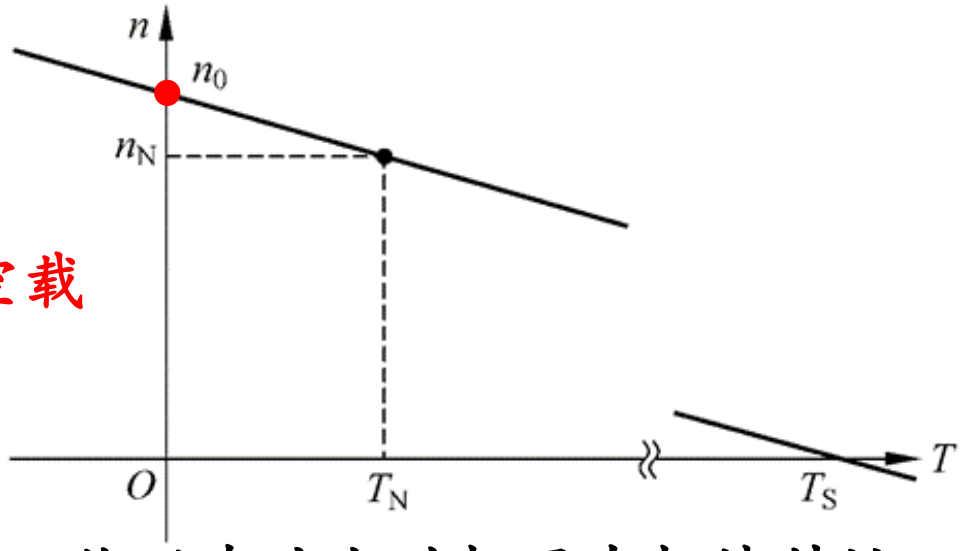
$$n=\frac{U_N}{C_e\Phi}-\frac{R_a}{C_eC_t\Phi^2}T$$

固有机械特性的特点：

① T越大，n越低。

② 当$T=0$时的转速为理想空载转速，即

$$n=n_0=\frac{U_N}{C_e\Phi_N}$$



他励直流电动机固有机械特性

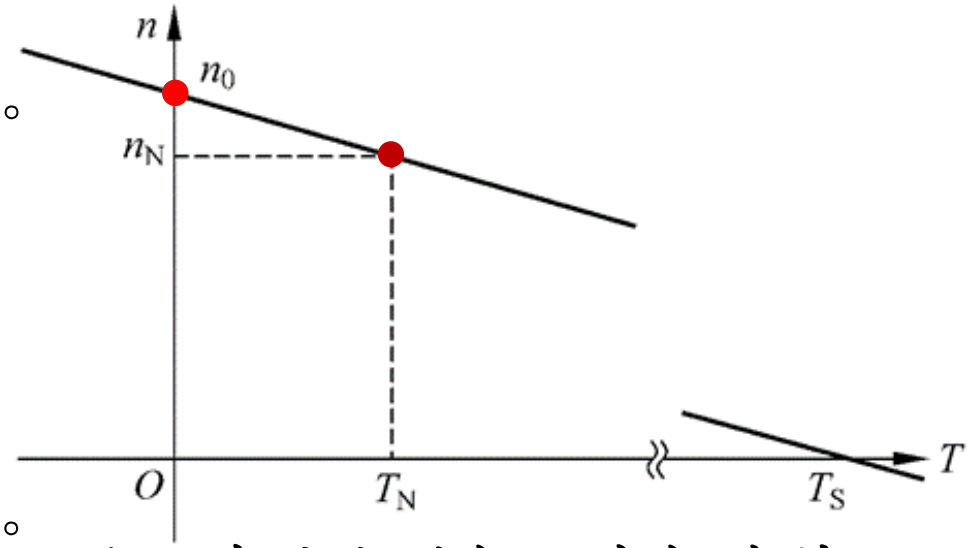
③ 斜率β值小时，称为硬特性；斜率β值大时，称为软特性。

④ 当$T = T_N$时，$n = n_N$，转速差 $\Delta n_N = n_0 - n_N = \beta T_N$为额定转速差。一般$n_N$约为0.95 n_0。

⑤ 电机启动时，$n=0$，则 $E_a=0$，此时电枢电流 $I_a=U_N/R_a=I_s$ 称为启动电流。$T = C_t\Phi_N I_s = T_s$称为启动转矩。由于电枢电阻很小，导致启动电流和启动转矩都很大，会烧坏换向器。

⑥ 当$T > T_s$, $n <0$时，则$E_a<0$。机械特性在第四象限。

⑦ 当$T<0, n>n_0$时，拖动转矩变为制动转矩，电流$I_a<0$，即工作在发电机状态。机械特性在第二象限。



他励直流电动机固有机械特性

例题 3-8 一台他励直流电动机额定功率96kW，额定电压440V，额定电流250A，额定转速500r/min，电枢回路总电阻0.078Ω，忽略电枢反应的影响，求：理想空载转速n_0和固有机械特性斜率β?

解题思路：

1、求n_0，现在额定工作点，算出

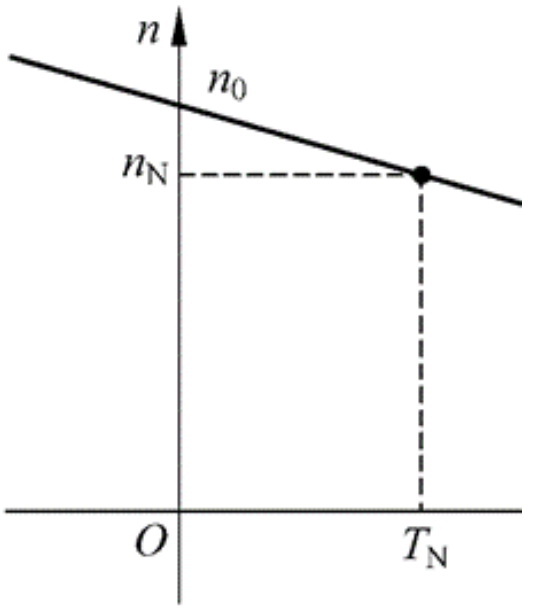
$$C_e\Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N}$$

再在I_a=0，算理想空载转速n_0：

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e\Phi_N}$$

2、求β，按定义式：

$$\beta = \frac{R_a}{C_e\Phi_N C_t\Phi_N}$$



解： 计算电动机$C_e\Phi_N$：

$$C_e\Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{440 - 250 \times 0.078}{500} = 0.841$$

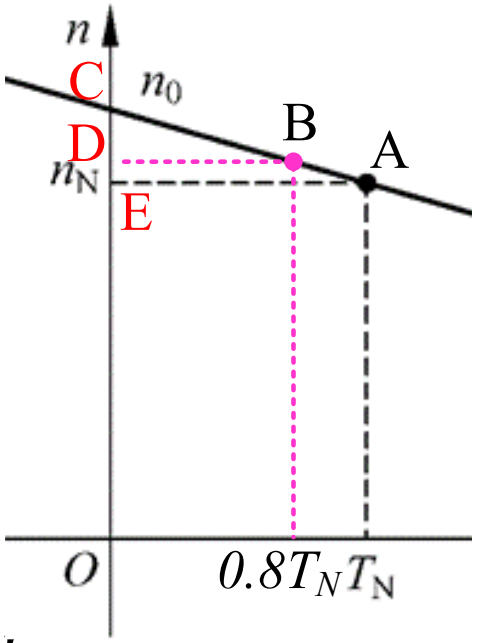
理想空载转速：

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e\Phi_N} = \frac{440}{0.841} = 523.2\ r/min$$

固有机械特性斜率β：

$$\beta = \frac{R_a}{C_e\Phi_N C_t\Phi_N} = \frac{R_a}{C_e\Phi_N 9.55 C_e\Phi_N} = \frac{0.078}{9.55 \times 0.841^{\,2}} = 0.0115$$

例题 3-9 某他励直流电动机额定功率22kW，额定电压220V，额定电流115A，额定转速1500r/min，电枢回路总电阻0.1Ω，忽略空载转矩T_0，电动机拖动恒转矩负载$T_L=0.85T_N$，求稳定运行时电动机转速、电枢电流及电动势？



解题思路：

1、求*B*点的转速*n*，I_a和E_a，先列出B点方程

$$E_a = C_e\Phi_N n, T = C_t\Phi_N I_a$$

$$U = E_a + I_a R_a$$

由于**5**个未知数（$C_e\Phi_N$），三个方程无法求解。

增加在**A**点方程：$U = E_{aN} + I_N R_a$；$T_N = C_t\Phi_N I_N$

注意本题中：$T_0 = 0$很重要。

解： 计算电动机$C_e\Phi_N$：

$$C_e\Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 115 \times 0.1}{1500} = 0.139$$

电枢电流：

$$I_a = \frac{T_L}{C_t\Phi_N} = \frac{0.85T_N}{C_t\Phi_N} = 0.85I_N = 0.85 \times 115 = 97.75A$$

电动机运行转速：

$$n = \frac{U_N - I_a R_a}{C_e\Phi_N} = \frac{220 - 97.75 \times 0.1}{0.139} = 1512.4\ r/min$$

电枢电动势：$E_a = C_e\Phi_N n = U_N - I_a R = 210.2\ V$

2.2 人为机械特性

定义：他励直流电动机的电压、励磁电流、电枢回路电阻大小等改变后，其对应的机械特性称为人为机械特性。

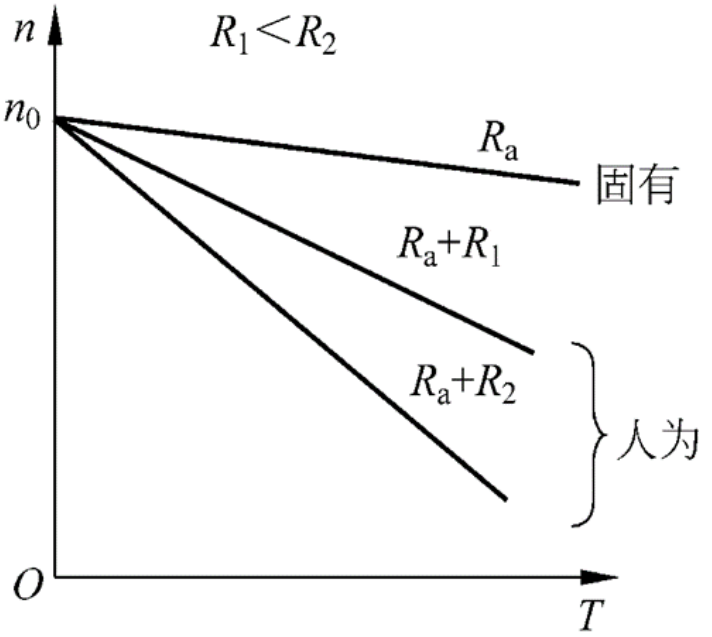
① 电枢回路串电阻的人为机械特性

★ 机械特性的表达式

$$n=\underbrace{\frac{U_N}{C_e\Phi_N}}_{n_0}-\underbrace{\frac{R_a+R}{C_eC_t\Phi_N^2}}_{\beta}T$$

☞ n_0 理想空载转速没有变化

☞ 斜率β，因串入R而大大倾斜。

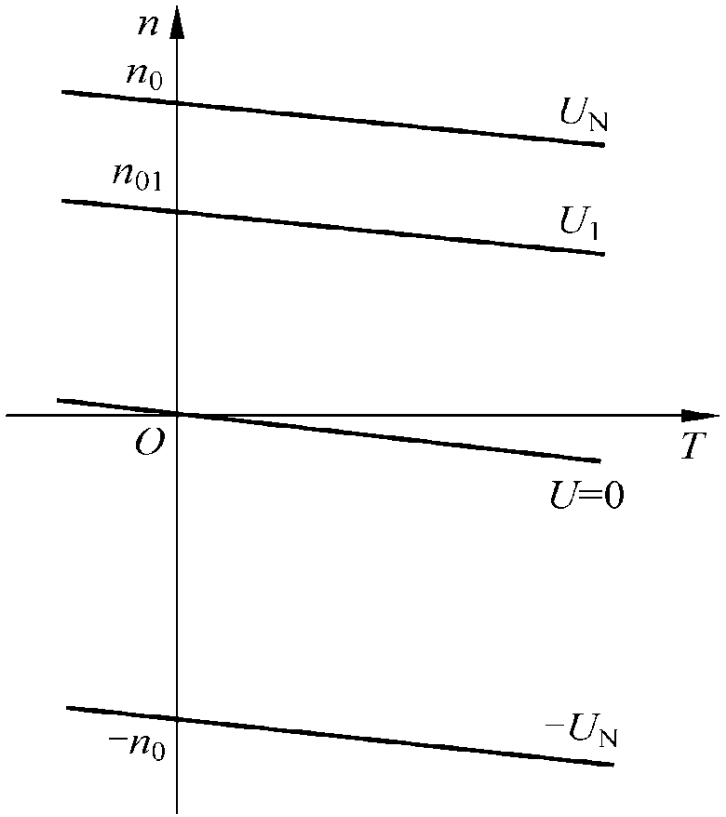


电枢串电阻人为机械特性

② 改变电枢电压的人为机械特性

$$n=\boxed{\frac{U_N}{C_e\Phi_N}}_{n_0}-\boxed{\frac{R_a+R}{C_eC_t\Phi_N^2}}_{\beta}T$$

- 机械特性为一组斜率不变，而理想空载转速点变化的平行线。
- 电压绝对值不能大于电压额定值。

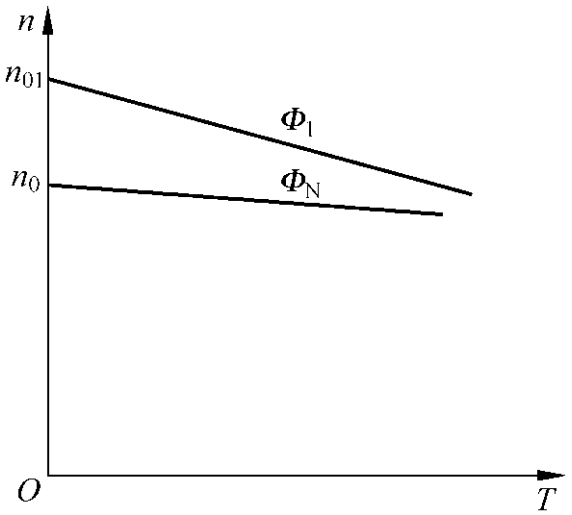


改变电枢电压人为机械特性

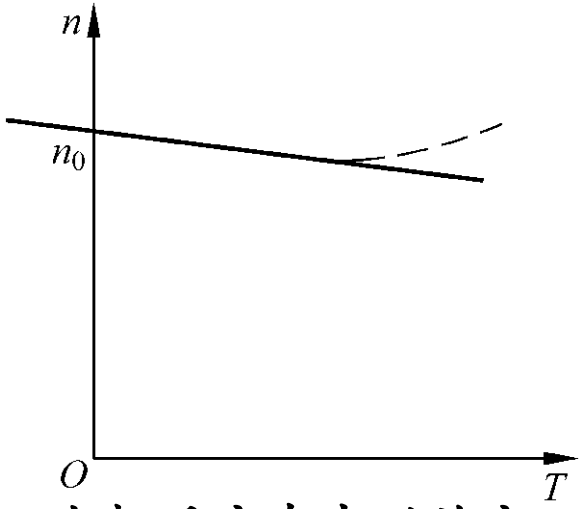
③ 减少气隙磁通量的人为机械特性

$$n = \frac{U_N}{C_e\Phi} - \frac{R_a}{C_e C_t \Phi^2} T$$

- 理想空载转速与 Φ 成反比，斜率与Φ^2成反比，即Φ 越小，n_0越高，斜率越大(越倾斜)。
- 对大容量电机，应加一稳定绕组来补偿电枢反应的去磁效应，否则将引起机械特性上翘。



减少每极磁通的人为机械特性



电枢反应有去磁效应时的人为机械特性

3、根据电机铭牌数据估算机械特性

只要找到特性上的两点，即$(n_0,\ 0)$点和$(n_N,\ T_N)$点，就可画出机械特性。

已知铭牌数据：n_N, U_N, I_N

求n_0和T_N的步骤：

① 估算E_{aN}或实测R_a

② 计算$C_e\Phi_N$ $C_e\Phi_N = \dfrac{E_{aN}}{n_N} = \dfrac{U_N - I_N R_a}{n_N}$

③ 计算n_0 $n_0 = \dfrac{U_N}{C_e\Phi_N}$

④ 计算T_N $T_N = C_t\Phi_N I_N = 9.55 C_e\Phi_N I_N$

例题 3-10 一台他励直流电动机的铭牌数据：额定容量50kW，额定电压220V，额定电流250A，额定转速1150r/min，试计算其固有机械特性。

解：（1）估算额定电枢电动势E_{aN}：

$$E_{aN} = 0.95U_N = 0.95 \times 220 = 209V$$

（2）计算$C_e\Phi_N$

$$C_e\Phi_N = \frac{E_{aN}}{n_N} = \frac{209}{1150} = 0.182\ V/(r \cdot min^{-1})$$

（3）计算n_0

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e\Phi_N} = \frac{220}{0.182} = 1208.8\ r/min$$

（4）计算T_N

$$T_N = 9.55C_e\Phi_N I_N = 9.55 \times 0.182 \times 220 = 434.5\ N \cdot m$$

本章结束

作业：3.4， 3.6 ，3.7