

黑、红色字需要掌握, 其他颜色字为补充内容, 视个人情况选用

在n用rpm和ω用rad/s时 $C_e \neq K_e$ 。若发现此种错误敬请指出, 谢谢!

引言: 控制系统的硬件组成: 控制器与驱动器、测量元件、校正(补偿)元件、执行机构

Lec 1

磁路基础:

Lec 2

$$B = \mu H \quad (\mu = \mu_0 \mu_r) \quad \phi = BS \quad (\vec{B} \cdot \vec{A}) \quad F_m = Ni \quad (\text{磁动势}) \quad U_m = Hl \quad (\text{磁压}) = \frac{Bl}{\mu} = \frac{\phi l}{\mu S}$$

具有相同单位 = $\phi R_m \quad (R_m = \frac{l}{\mu S})$

$$\sum_i \phi_i = 0 \quad (\text{基尔霍夫磁通定律, 类似KCL})$$

$$\sum_i Ni = \sum_i H_i l_i = \sum_i U_{mi} = \sum_i R_{mi} \phi_i \quad (\text{基尔霍夫磁位差定律, 类似KVL})$$

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = Blv \quad (\text{单匝})$$

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad \rightarrow \quad F = BIl \quad (\text{宏观电磁力, } B, I, l \text{ 三者垂直})$$

$$T_e = BIlr$$

$$F_{em} = \frac{1}{2} \phi_s^2 \frac{dR_s}{ds}$$

圆柱面磁场间的力矩: $T = k \sin(p\theta)$, p 为极对数.

直流电机: (共11个问题)

1. 结构图

Lec 3

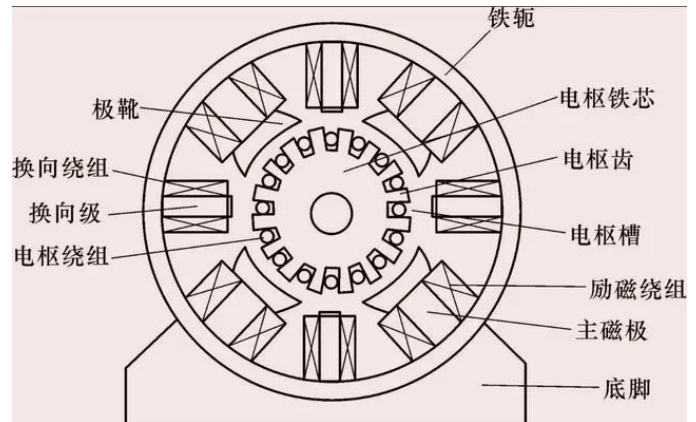
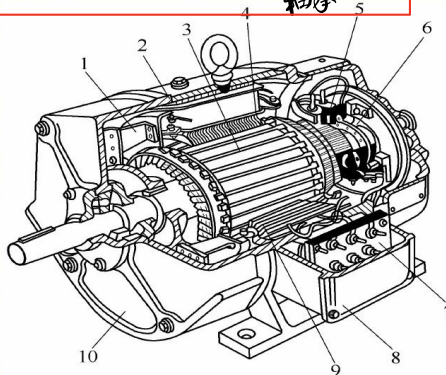
1.1.2 直流电机的基本结构

直流电机由定子(固定不动)与转子(旋转)两大部分组成, 定子与转子之间有空隙, 称为气隙。

定子部分包括机座、主磁极、换向极、端盖、电刷等装置;
转子部分包括电枢铁心、电枢绕组、换向器、转轴、(风扇)等部件。

图1.3 直流电动机的结构图

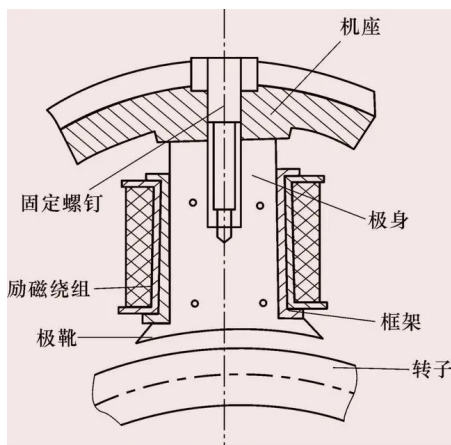
- 1—风扇; 2—机座;
- 3—电枢; 4—主磁极;
- 5—刷架; 6—换向器;
- 7—接线板; 8—出线盒;
- 9—换向极; 10—端盖



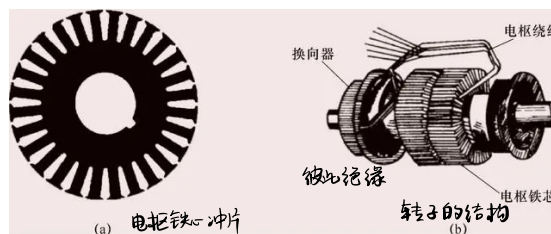
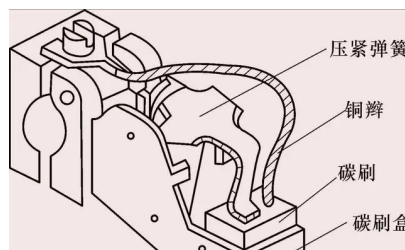
剖视图

电刷装置把电枢中的电流与外部静止电路相连或把外部电源与电枢相连, 并把电枢中的交变电流变成电刷上的直流, 或把外部电路中的直流变换为电枢中的交流。

电刷结构图



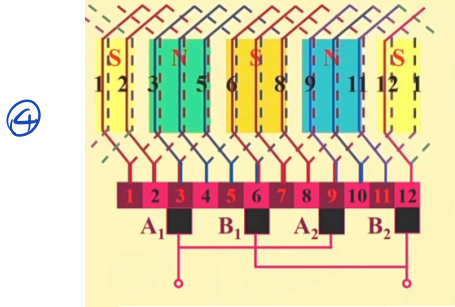
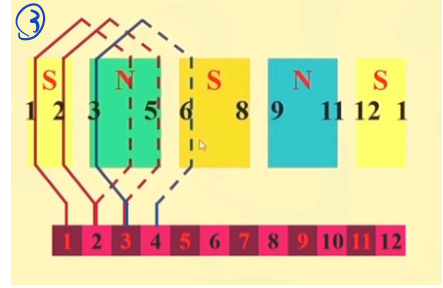
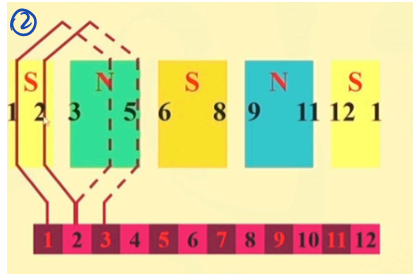
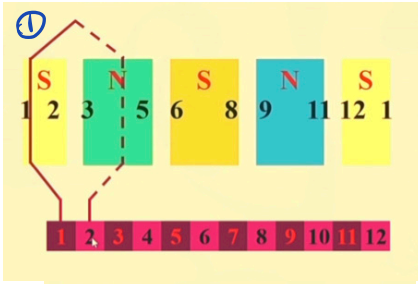
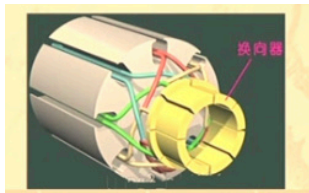
定子的结构(剖视)



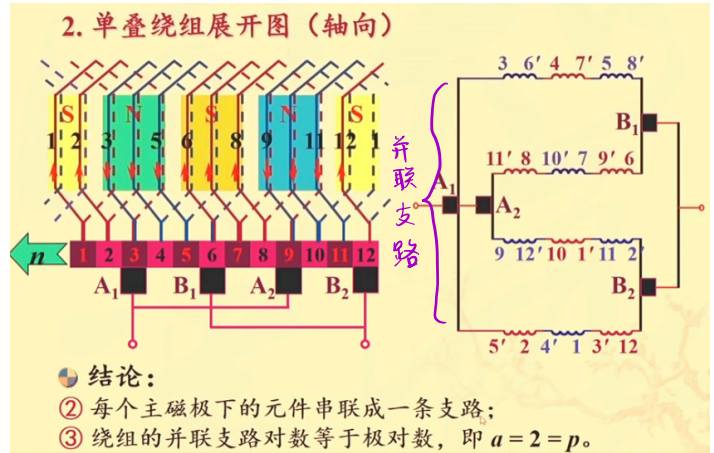
叠绕组、波绕组、蛙绕组...
(简单了解即可)

单叠绕组：(补充，便于理解后续一些内容)

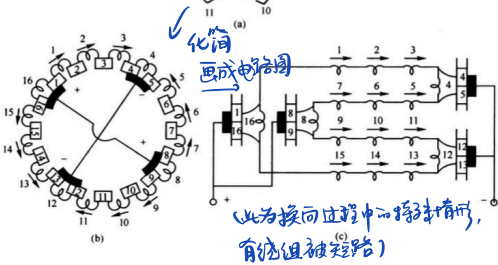
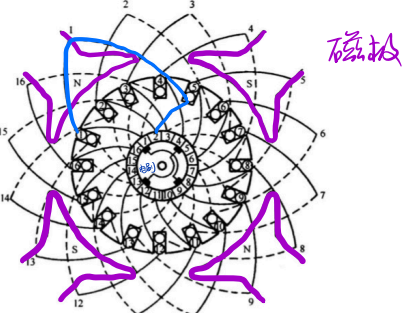
轴向展开图：此处共有12根导体，每根导体末端(下边)与下一根导体始端(上边)相接



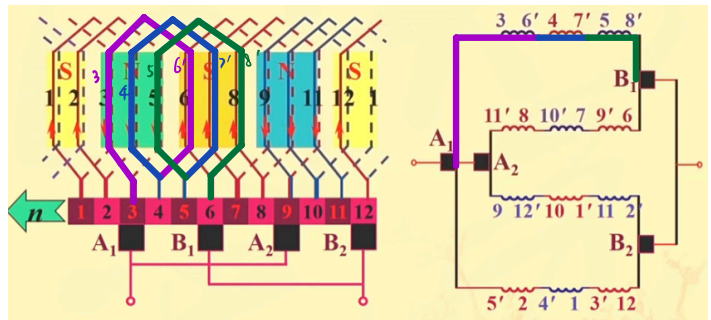
“并联支路”
的理解：



书本例子
有6根导体。



为方便起见，标出如下支路：



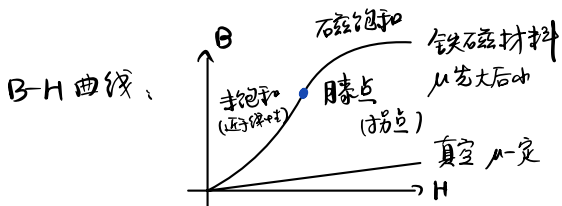
2. 工作原理 (略) 书 P18 注意换向分析

Lec 3

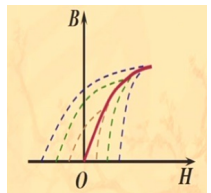
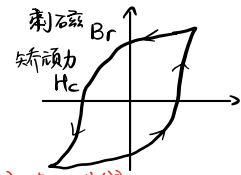
3. 磁性材料 (铁磁材料)

Lec 4

非铁磁材料：顺磁 (空气)、反磁 (铜)



存在磁滞现象，
若反复磁化若干次，可得到关于
原点对称的闭合曲线，称为磁滞回线
将这些磁滞回线的顶点相连，即得基本磁化曲线。



了解：三个参数：剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 、最大磁能积 $(BH)_{max}$

软磁、硬磁材料的特点与用途

磁滞损耗 $P_h = C_h f B_m^n V$ n 取 1.6~2.3

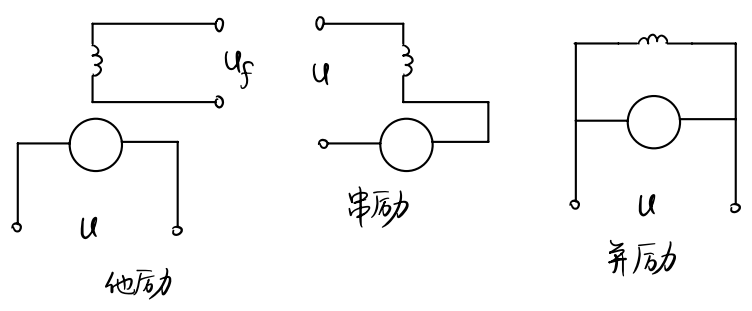
h : hysteresis

涡流损耗： $P_e = C_e d^2 f^2 B_m^2 V$ (d : 厚度)

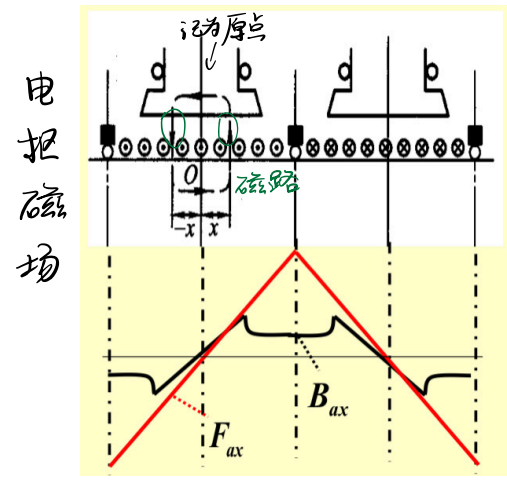
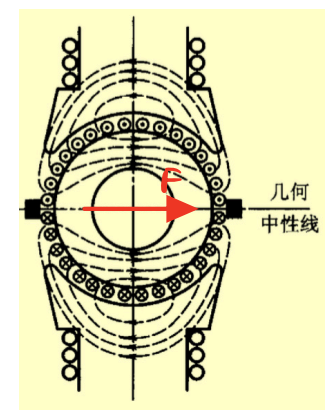
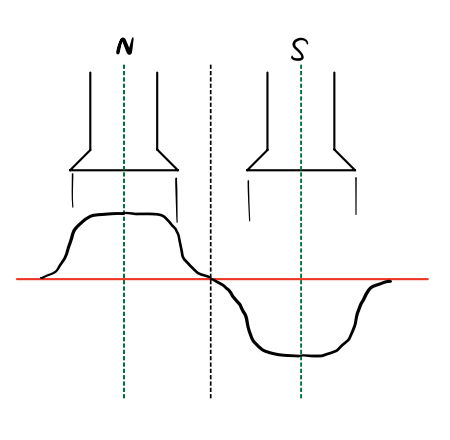
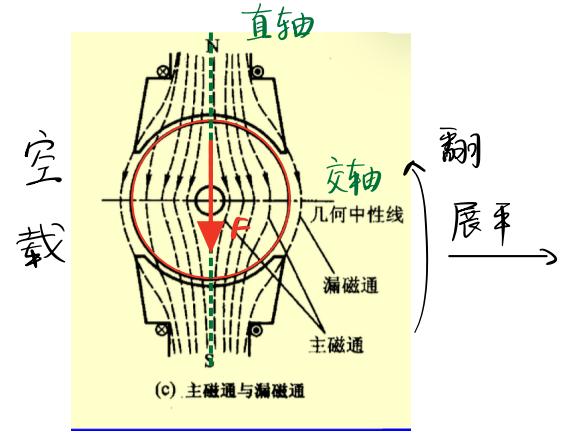
e : eddy current

4. 直流电机的磁场

励磁方式：他励、并励、串励、^{*}复励
 自励



电机磁场 = { 主极磁场 (空载磁场)
 电枢磁场

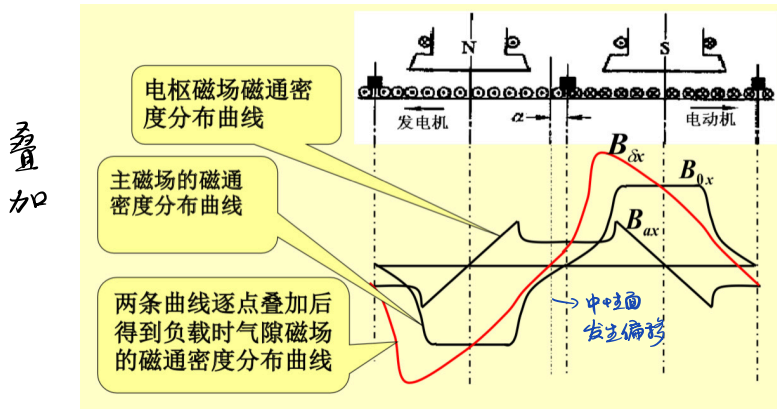


$$F_{ax} = \frac{1}{2} \frac{N c a}{\pi D} 2x = \frac{N c a}{\pi D} x \propto x$$

(磁动势) \downarrow 单位长度的导体数 \times 导体长度 \times 导体厚度

磁感应强度 (磁密) $\frac{F}{\mu l} = B$
 $\mu l \rightarrow$ 气隙长度

主磁极下气隙长度基本不变，两个主磁极间气隙长度增加很快，致使电枢磁动势产生的气隙磁通密度中间较小，呈马鞍形分布。



物理中性面 (即此面上净磁通为0)
 F (电枢)
 F (主极磁场)
 (合成)
 (使合成磁场相对于原主极磁场逆时针转动，即物理中性面逆时针转动)

5. 电枢反应与^{*}换向

电枢反应：① 使物理中性面和几何中性面发生偏转 (电动机)

② 对主磁场起去磁作用 (工作点在膝点，增大B进入饱和，则对于同样的B改变量，B增大时 ϕ 增加量不如B减小时 ϕ 减少多)

改善换向：① 将电刷从几何中性面向物理中性面旋转，② 加换向极，③ 换电刷。

6. 直流电机基本方程

① 机械特性 $T_{em} = C_t \phi I_a \stackrel{\phi \text{一定}}{=} K_t I_a, C_t = pN/2\pi a$

$E_a = C_e \phi n \stackrel{\phi \text{一定}}{=} K_e \omega, C_e = pN/60a$

其中 n 取 r/min, T_{em} 取 N·m, ω 取 rad/s
 ≈ 9.55

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

$K_e = \frac{60 C_e \phi}{2\pi}$
 $K_t = C_t \phi$
 $K_e = K_t$

即: $T_{em} = K_t I_a$
 $E = K_e \omega$
 均用国际单位 (ω 用 rad/s)
 则有 $K_e = K_t$

若 n 与 ω 单位均取为 rad/s, 则 $C_t = C_e$,
 $K_e = C_e \phi$
 一般不这么干

可结合单叠绕组理解“并联支路”, 但注意单叠绕组中 $a=p$, 其他种绕组不一定适用

推导 设总导体数为 N , 共有 $2a$ 条并联支路, 则每条支路有 $N/2a$ 条导体, 则

$T_{em} = \sum B_s i_l r = N B_s i_l r = N B_s \frac{2\pi r l}{2p} \frac{I_a 2p}{2\pi} = \frac{N}{2a} \phi I_a \frac{2p}{2\pi} = \frac{pN}{2\pi a} \phi I_a$

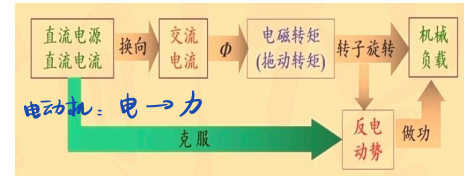
导体长度 力臂
 选一条并联支路计算, 而一条支路上每个绕组元件又是串联, 所以要求和。

$e = \sum B_s l v = \frac{N}{2a} B_s l v = \frac{N}{2a} B_s \frac{2\pi r l}{2p} \omega \frac{2p}{2\pi} = \frac{N}{2a} \phi \omega \frac{2p}{2\pi} = \frac{pN}{2\pi a} \phi \omega = \frac{pN}{2\pi a} \phi n \times \frac{60}{2\pi} = \frac{pN}{60a} \phi n$

② 转矩平衡方程式

电动机: $T_{em} = T_0 + T_L + J \frac{d\omega}{dt}$ T_0 : 空载阻转矩 T_L : 负载转矩 J : 转动惯量
 $= T_0 + T_L$ (稳态)

发电机: $T_{em} = T_1 - T_0$ T_1 : 原动机转矩 T_0 : 阻转矩

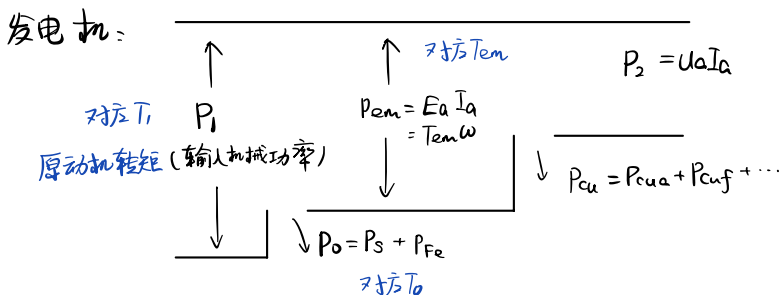
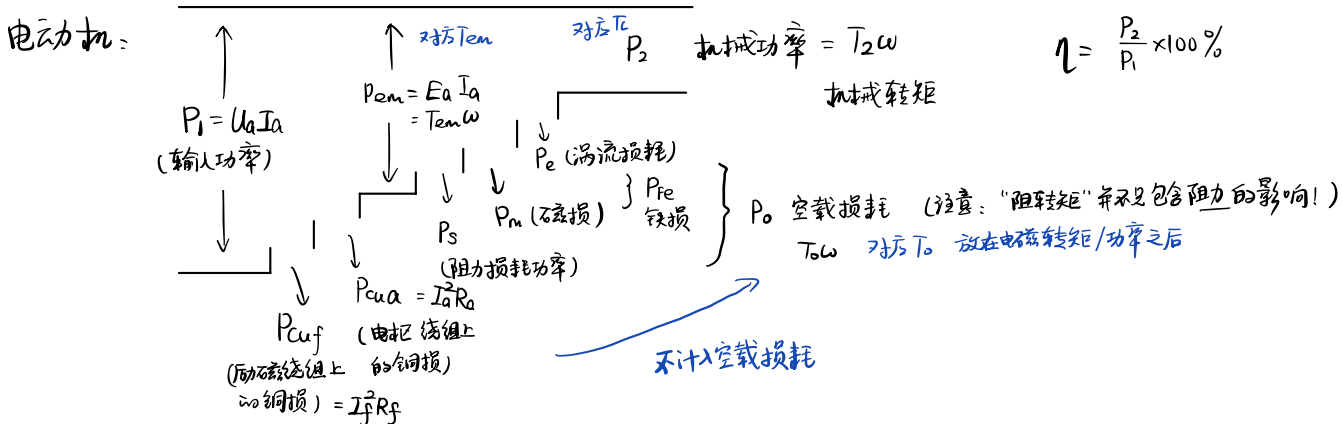


③ 电压平衡方程式

电动机: $U_a = E_a + I_a R_a (+ L_a \frac{di_a}{dt})$
 U_a 电枢电压 E_a 感应电动势 I_a 电枢电流

发电机: $U_a + I_a R_a = E_a$ 对于纯电阻负载 $U_a = I_a R_L$

④ 功率平衡方程式



$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$

7. 直流电机的静态特性 (稳态特性)

[此时有 $T_{em} = T_o + T_2$]

$$\text{由 } I_a = \frac{U_a - E_a}{R_a} = \frac{U_a - C_e \phi n}{R_a} \quad \text{则 } n = \frac{U_a}{C_e \phi} - \frac{I_a R_a}{C_e \phi} = \frac{U_a}{C_e \phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \phi^2}$$

电枢控制: (ϕ 为定值) 对后调速调速

线性程度高, 控制功率大, 对功放容量要求高

① 机械特性 $n \sim T_{em}$

$$n = \frac{U_a}{C_e \phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \phi^2} = -\frac{R_a}{C_e C_t \phi^2} T_{em} + \frac{U_a}{C_e \phi}$$

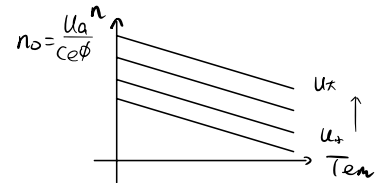
关于 T_{em} 的函数,

U_a 变动产生一族曲线

几个重要点: ① $T_{em} = 0$ (空载) $n_o = \frac{U_a}{C_e \phi}$ 实际有阻转矩 T_o , 则 $n'_o = n |_{T_{em} = T_o}$

② $T_{em} = T_N$ 额定情况

③ $n = 0$ $T_s = \frac{U_a}{R_a} C_t \phi = I_s C_t \phi = I_s k_t$ 堵转转矩



电压提高时曲线上移, 瞬时转速不变, 则对应转矩增大, 移至新直线上, 随后沿线加速至稳定.

② 调节特性 $n \sim U_a$

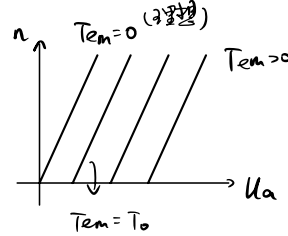
$$n = \frac{1}{C_e \phi} U_a - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \phi^2}$$

关于 U_a 的函数,

T_{em} 变动产生一族曲线

斜率 $\tan \alpha = \frac{1}{C_e \phi} > 0$

空载时 (理想) $T_{em} = 0$ 图线过原点



(实际) $T_o \neq 0$ 不过原点 令 $n=0$ 得启动电压 $\frac{T_{em} R_a}{C_t \phi} = \frac{T_o R_a}{C_t \phi} = k_t$

磁场控制: 对应后续弱磁调速

非线性, 适于控制大功率电机

$$n = \frac{U_a}{C_e \phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \phi^2}$$

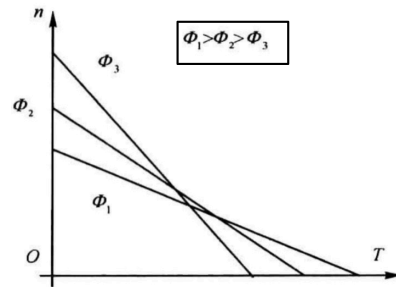
机械特性: $n \sim T_{em}$, 为直线

可见, 若不考虑额定电流的限制, 当负载转矩一定时,

若负载轻, $\phi \downarrow$ $n \uparrow$; 负载重, $\phi \downarrow$ $n \downarrow$.

减 ϕ 提 n 并不是绝对的!

当然, 调 ϕ 的方法一般用带恒功率负载, 稍后提及.



调节特性: $n \sim \phi$ T 小时与 T 大时不同.

$$\frac{dn}{d\phi} = -\frac{U_a}{C_e \phi^2} + 2 \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \phi^3} \quad \text{令其为0}$$

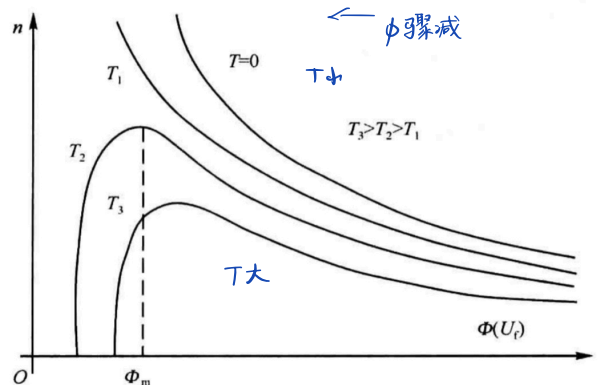
$$\text{则 } 2 \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t} = \frac{U_a}{C_e \phi_m} \Rightarrow \phi_m = \frac{2 T_{em} R_a}{U_a C_t} \propto T_{em}$$

$$n_{max} = \frac{U_a^2 C_t}{4 C_e T_{em} R_a} \propto \frac{1}{T_{em}} \quad \begin{matrix} \phi > \phi_m \text{ 时, } \phi \downarrow, n \downarrow \\ \phi < \phi_m \text{ 时, } \phi \downarrow, n \uparrow \end{matrix}$$

引申问题1: 若他励(或并励)式直流电动机的励磁回路断开,

有何后果? (结合右图思考)

[T 小时飞车; T 大时堵转 ($I_a = \frac{U_a}{R_a}$, 很大, 烧电机)]



8. 直流电机的调速方法 [以他励直流电机为例]

由 $E_a = C_e \phi n$ $U_a = I_a R_a + E_a$, 有 $n = \frac{U_a - I_a R_a}{C_e \phi}$

变什么可以改转速?
 U_a, R_a, ϕ (I_a ? 不是直接控制量)

(1) 串电阻调速 R_a 串上 R_{var} 改变电枢回路电阻

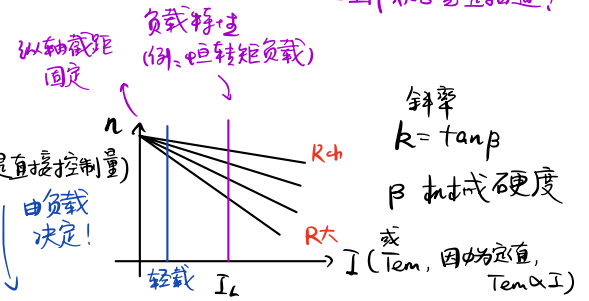
$R \uparrow$ $n \downarrow$ (T_L, I_L 相同时) (不可能超过 $\frac{U_a}{C_e \phi}$)

特点: ① 简单 ② 损耗大 ③ 降速调速

④ 一般为有级调速

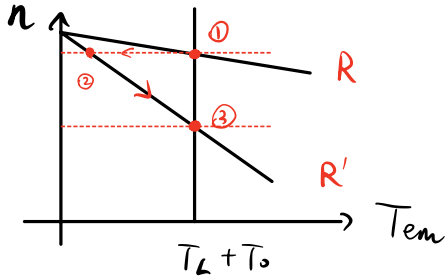
⑤ 特性变软 ($n-T$ 线变陡, 抗负载 T_L 能力变差, 即 ΔT_L 有更大 Δn)

⑥ 轻载时调速范围小.



$C_t \phi I_a = k_t I_a = T_{em} = T_0 + T_2$,
 负载一定, 电机达到稳态时,
 电枢电流由 T_2 决定! 所以对于恒转矩负载,
 若 ϕ 不变, 则 I_L 是平行于纵轴的线 ($T_L = \text{const.}$)
 (即相同负载, 稳态时电流一样)
 在下面降压调速中, 也如此.

动态过程 (以增大 R 为例)

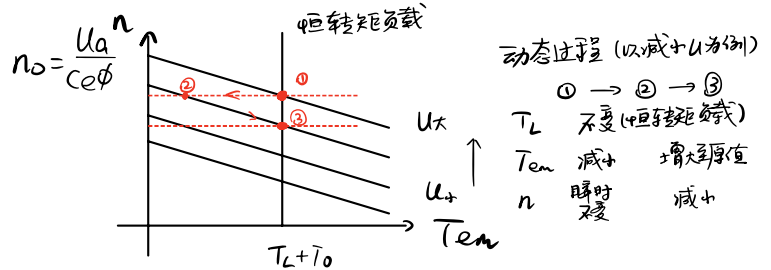


① $T_{em} T_0 + T_L \downarrow$ $T \uparrow$ $T_0 + T_L$
 T_L 不变 (恒转矩负载)
 n 瞬时不变 $n_1 \downarrow n_2$
 T_0 较小, 在可接受范围内略去 或将 $T_0 + T_L$ 视作不变

(2) 降压调速 (调节电枢电压 U_a)

$n = \frac{U_a - I_a R_a}{C_e \phi} = \frac{U_a}{C_e \phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \phi^2}$

图形即为电枢控制下的机械特性



动态过程 (以减小 U_a 为例)
 ① \rightarrow ② \rightarrow ③
 T_L 不变 (恒转矩负载)
 T_{em} 减小 增大到原值
 n 瞬时不变 减小

特点: ① 基速以下调速 (超过基速的调速需要更大 U_a , 对设备安全有影响)

② 线性直线族特性, 范围大 ③ 易于无级调速 ④ 效率高 (无外加电阻)

⑤ 需调压电源, ⑥ 硬度不变, ⑦ 适于带恒转矩负载 (因 ϕ 不变, T 不变时 I_a 不变, 不会过流)

问题: 带额定转矩以额定转速工作时电枢电压为额定电压

需要超过 (额定) 转速时用此法电枢电压必超过额定电压, 不允许。怎么办? 考虑减小 ϕ .

↓
 其实可以适度减小负载, 但这样功率下降多且调节范围也有限.

于是有: (3) 弱磁调速

减小励磁电流以减小 ϕ , 从而增大 n

但是,如果 ϕ 减小后,仍带恒转矩负载,由 $T_{em}=C_t\phi I_a$, I_a 将超过额定电流,也不允许。

稍后总结:适于带恒功率/转矩负载的方式带恒转矩/功率负载会如何?

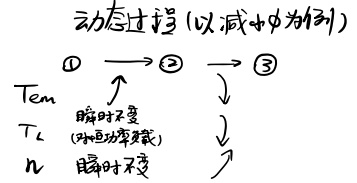
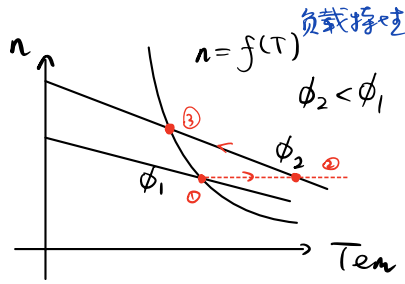
弱磁调速带恒转矩负载
不是完全不行,但务必注意额定电流!

那么,若我们保持电流为额定电流不变? 则发现 $n = \frac{U_a - I_a R}{C_e \phi}$ $T_{em} = C_t I_a \phi$

$T_{em} n = \text{常数} \Rightarrow$ 适于带恒功率负载! 且允许的恒功率负载的最大功率就是额定功率
pp+中弯线的来源

$$n = \frac{U_a - I_a R}{C_e \phi} = \frac{U_a}{C_e \phi} - \frac{T_{em} R_a}{C_e C_t \phi^2}$$

图开,即为磁场控制下的机械特性



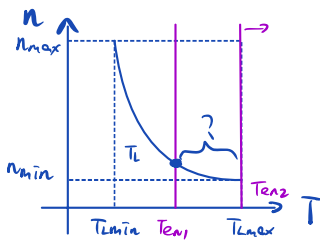
[弱磁的另一理由:电机工作点一般在膝点,增磁加弱磁饱和,控制效果不好]

- 特点:
- ① 基速以上调速;
 - ② 无级调速;
 - ③ 机械特性曲线变软 (ϕ 越小 $n-T$ 线越陡,即相同 ΔT 会带来更大 Δn)
 - ④ 高效率
 - ⑤ 适于带恒功率负载(已解释)
 - ⑥ 一般调速比范围在2~4.

隐患: ① ϕ 太小 I_a 过载; ② 飞车(特性软) ③ 堵转 $I = \frac{U_a}{R_a}$ (任何调速方式都要避免)
 $(U_a = I_a R_a + E_a \quad E_a = C_e \phi n)$
 注意堵转转矩不是0 (不要因为不转而误解!)

引申问题2: 适于带恒功率/转矩负载的方式带恒转矩/功率负载会如何?

1. 适于带恒转矩负载的调速方式被用于带恒功率负载:

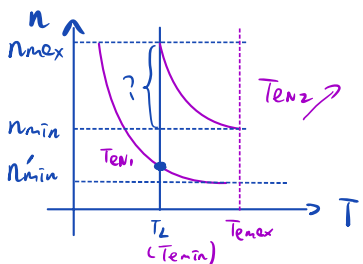


如果恒转矩负载调速方式能调的转矩最大值 T_{em1} 位于左图中 T_{em1} 处, 则 T_L 中比 T_{em1} 大的转矩全都调不了。(额定)

因此, T_{em} 至少应取 T_{em2} 右侧. 另外, 额定转速也必须是 n_{max} , 否则不能调到所有所需的转速.

这样, 额定功率 $P_N = T_N \omega_N = T_{Lmax} \omega_{max} = T_{Lmax} \omega_{min} \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}} = P_{N0} \frac{n_{max}}{n_{min}} \Rightarrow P_{N0}$
 原来的额定功率 浪费!

2. 适于带恒功率负载的调速方式被用于带恒转矩负载:



如果恒功率负载调速方式能调的额定转矩(即功率为额定值) T_{em1} 位于左图中 T_{em1} 处, 则 T_L 中比 T_{em1} 大的转速全都调不了(超功率!)

因此, T_{em} 至少应取左图中 T_{em2} 上侧. 这样, 低速时转矩 $T_e = \frac{P_N}{\omega_{min}} = \frac{P_N}{\omega_{max}} \frac{n_{max}}{n_{min}} \Rightarrow T_L$
 不合理!

(4) 直流电机的启动: 启动时 $n=0 \Rightarrow E_a=0 \Rightarrow I = \frac{U_a}{R_a}$ 很大, 不允许

方法: 降压启动、串电阻启动

9. 直流电机的四象限运行 (工作状态)

易混, 注意判别!

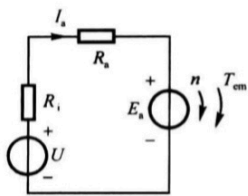
① 电动机状态

外加电压大于电机感应电动势且与之反向, (意思应该是沿着回路走一圈发现电位升降关系相反)

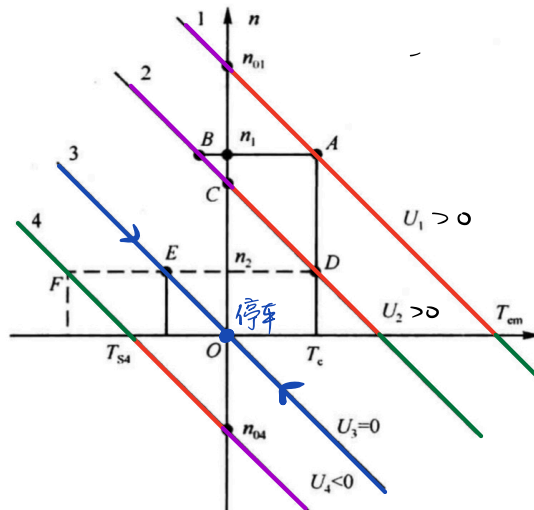
电流与 E_a 反向, 数值小于堵转电流。
(是“不从 E_a 正端流出”的意思)

电磁转矩方向与转速 n 相同,

转速低于空载转速, 电能 → 机械能



(a) 电动机工作状态



② 制动状态

电磁转矩方向与转速 n 相反,

电流与感应电动势同向 (从 E_a 正端流出)

1) 能耗制动状态 (可理解为串电阻)

无外加电压, 电流与 E_a 同向.

(是“从 E_a 正端流出”的意思)

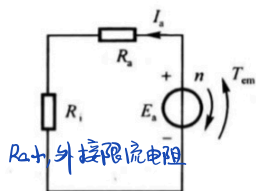
1. 制动前

2. 制动后

假如有外力作用,

也可能沿着线2继续往前

(如拖着重物的电机)



(c) 能耗制动状态



- 电动机状态
- 发电机
- 能耗制动状态
- 反接

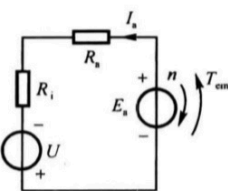
2) 反接制动状态

外加电压与电机感应电动势同向,

电流与 E_a 同向, 数值大于堵转电流. (故需增加限流电阻)

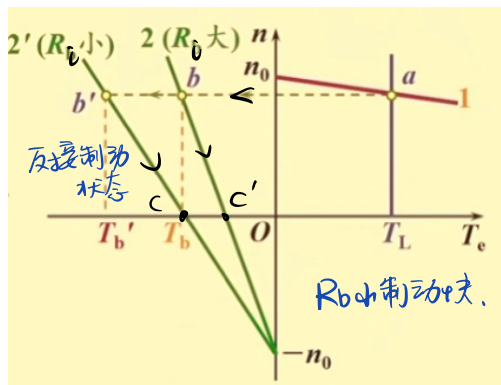
(是“不从 E_a 正端流出”的意思)

$$|I_a| = \frac{|U| + |E_a|}{R_a + R_i}$$

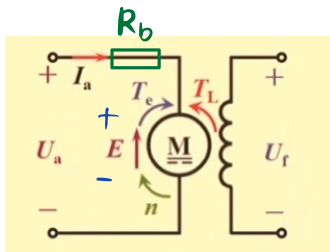


(d) 反接制动状态

例1



例2 (易错例)



突然接入电阻 R_b ,

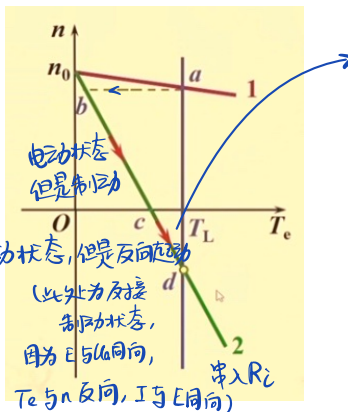
工作状态?

[沿左图的线变化]

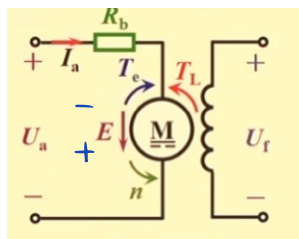
R_b 小制动快, R_b 大终了速度大

反接后工作点将沿箭头所示方向移动,

到达c点: { 若立即断电, 则停机
若未立即断电, 则视负载情况到达对应工作点
(负载 $n-T$ 线与电机 $n-T$ 线交点)
见下例1



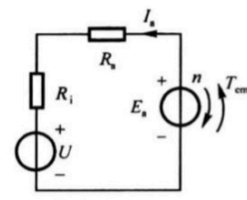
此段的示意图:



3) 反馈制动状态 (发电机状态)

一般发生在: ①突然降电压时; ②有“协助”转子转动的外力作用时,

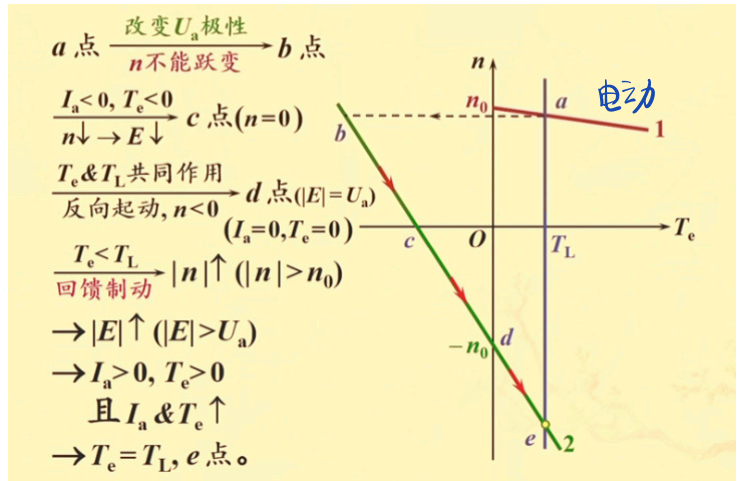
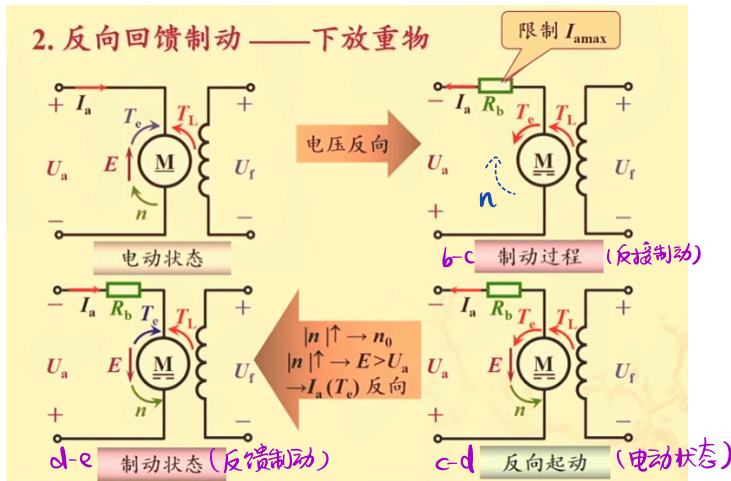
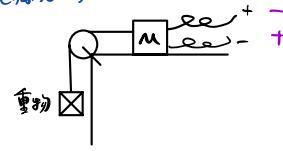
外加电压与电枢感应电动势反向但小于感应电动势; $|n| > |n_0|$



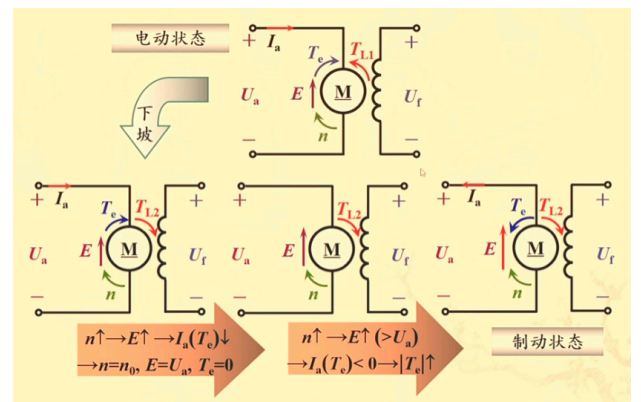
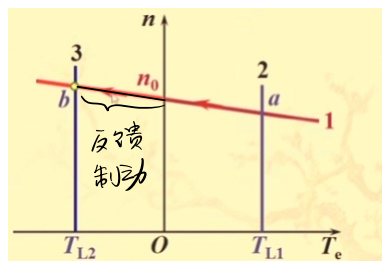
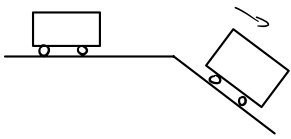
(b) 发电机工作状态

电流与感应电动势方向相同 (电流从电机电动势“+”流出, 相当于电机在供电)
(流入电源的“+”端, 给电源充电)

例1 拖着重物的电机, 突然将其电压反接;

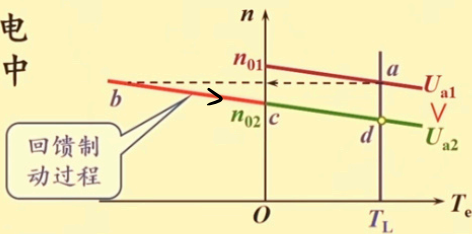


例2 电车下坡

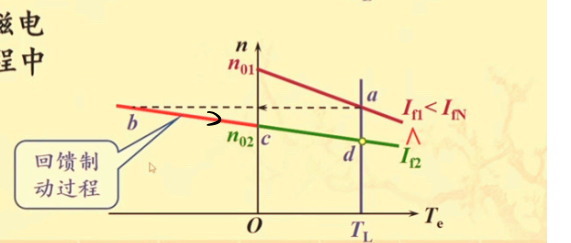


例3 降压调速、弱磁调速 (调多了)

在降低电枢电压调速过程中



在增加励磁电流调速过程中



10. 直流电机的动态转矩

机电时间常数 $T_m = \frac{RaJ}{KeKt}$

电磁时间常数 $T_e = \frac{La}{Ra}$

式中各量均用国际单位制, 只有 $Ke = Kt$.

11. 直流电机的选用

若带减速装置, 且减速比为 i , 则负载轴各量至电机轴的折算值为: (以下的下标L者为负载轴上的量)

$\omega = \omega_L i$ $\alpha = \alpha_L i$ $J = \frac{J_L}{i^2}$ $T = \frac{T_L}{i}$

根据运动推这三个

根据功率关系 (能量守恒) 推这个

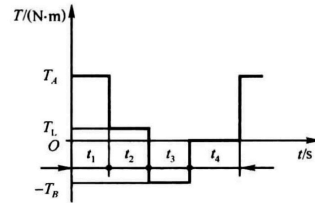
若电机为断续运行, 则一个周期内有 t_1, t_2, t_3, \dots 若干段, 每段对应的电磁转矩要求已知, 分别为 T_{em1}, T_{em2}, \dots

则额定转矩可由此式计算:
(以均方根表示)

$$T_N = \sqrt{\frac{T_{em1}^2 t_1 + T_{em2}^2 t_2 + \dots + T_{emn}^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

(对于右图)

$$T_{rms} = \sqrt{\frac{T_A^2 t_1 + T_L^2 t_2 + T_B^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}}$$



部分图片来自网络, 部分图片取自《自动控制元件及线路》(5版) 及其课件。

单叠绕组示意图、工作状态中的例子等截取自大连理工大学电气工程学院刘凤春老师的课件,

对其原创者不胜感激。