

电机及拖动基础

备课笔记

邵 群 涛

南京工程学院 自动化系

数控教研室

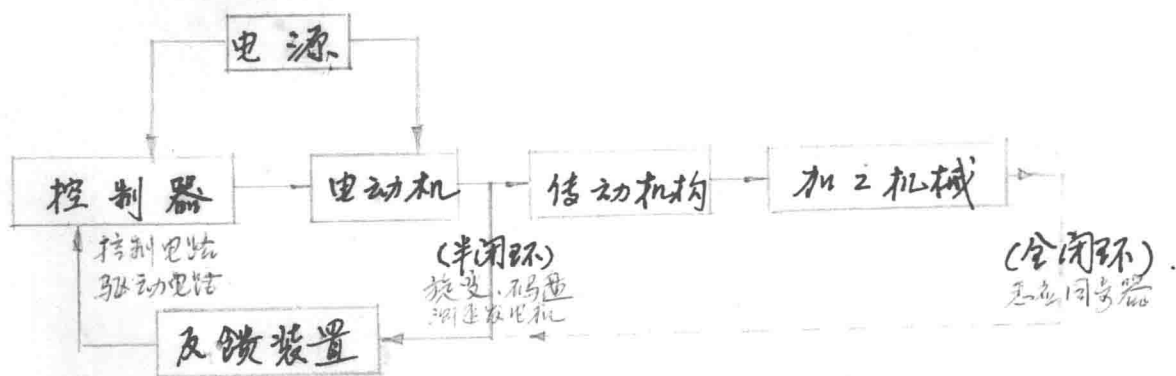
南京机械高等专科学校备课笔记

电机拖动基础

绪 论

一. 课程的性质和任务

1. 性质：是一门本专业的专业基础课
既不同于专业基础课（如电工基础）
也不同于专业课（如机械电路及PLC）
2. 对象：主要是电动机——机电一体化的结合部。



3. 内容：包括电机原理及电力拖动两个部分、三门课程内容。

(1) 电机原理：

大电机：直流电机、变压器、交流电机（异步、同步）

控制电机：步进电动机、伺服电动机、旋转变压器、测速发电机、自整角机等

(2) 电力拖动基础：电动机的机械特性（转矩、转速关系）

负载的转矩

电动机的各种运转状态：起动、制动、调速等

南京机械高等专科学校备课笔记

4. 任务: 掌握各种电机的基本原理、特性、控制及使用方法。

二. 电机及电力拖动的发展概况

电能是现代人类活动的最主要能源之一, 电能的生产、传输、分配、使用等要靠各种电机来实现。

发电 $\longrightarrow$ 传输 $\longrightarrow$ 使用。
分配

发电机. 电力变压器. 电动机
———
电力系统 用户: 生产、家庭。

三. 教学要求:

1. 牢牢掌握两方面规律

(1) 电磁感应规律: a. 电磁感应定律: $e = -\frac{d\psi}{dt}$
或 $e = B \cdot l \cdot v$ (方向右手定则)

b. 电磁力定律: $f = B \cdot l \cdot i$ (方向: 左手定则)

(2) 拖动单位的运动规律: $T_{em} - T_2 = J \frac{d\Omega}{dt}$ — 转矩平衡。
电磁转矩 负载转矩 转动惯量

2. 掌握电机重要理论: 交、直流电机、变压器基本理论

3. 掌握电机性能和使用方法 (分析及运用)

4. 抓住各个环节:

课堂教学, 实验, 作业, 预习, 复习。

南京机械高等专科学校备课笔记

第一章 直流电机

§1-1 直流电机的工作原理(和结构)

一、直流发电机的工作原理

(一) 连续电势的产生

电磁感应现象:

导体在磁场中运动,

切割磁力线产生电势

计算: $e = B_x l v$

方向: 右手定则 (v : 大拇指)

单位: e : V

B_x : 特斯拉 = 韦/米²

l : 米

v : 米/秒

磁感应强度 (径向)

磁场中导线有效长度

导线垂直切割磁通线速度

为导线在磁场中旋转

则其切割 B_x 的有效速度为

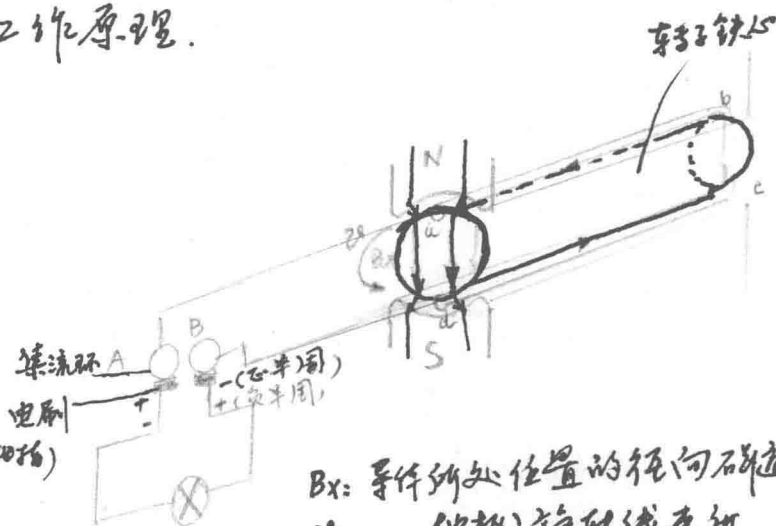
$$v_y = v \cos \theta$$

$$e = B_x l v \cos \theta$$

B_x 的波形为梯形波如图。 e, i 波形基本同余弦波

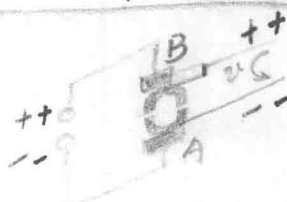
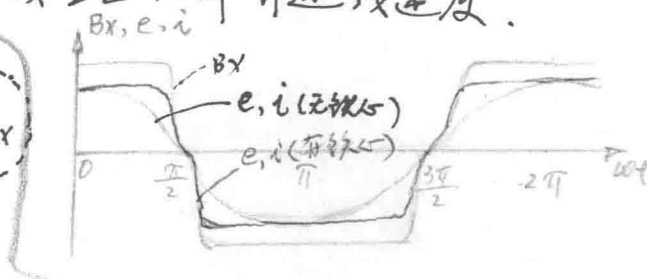
⇒ 换向器的作用及直流电的产生

把集流环改成下图的换向片。则可在电刷 A 和 B 上得到直流电势。

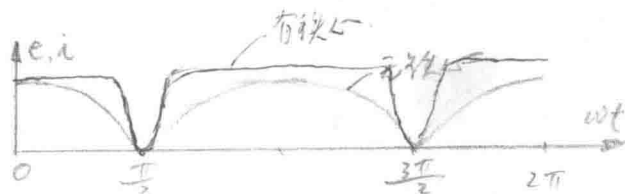


B_x : 导体所处位置的径向磁通密度

v : ... (电枢) 旋转线速度

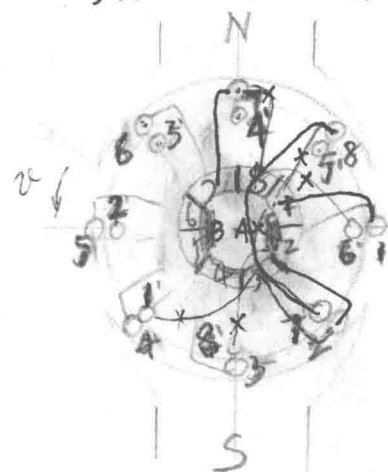


南京机械高等专科学校备课笔记



~~(二) 环状绕组的两极电机~~

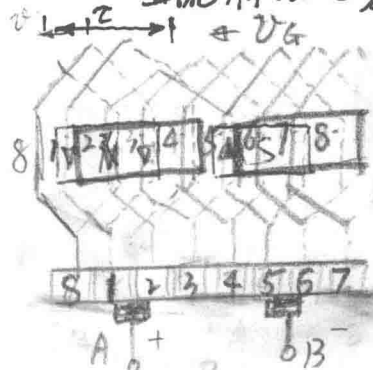
(三) 实际的两极电机



(接线为黑线)

当串接在电刷两端的
转子导体数增多时，
其电势 e 和电流 i 也
将平滑。(只画出两线圈
相串的 e, i)

直流脉动电势 τ —极距 $\tau=4$



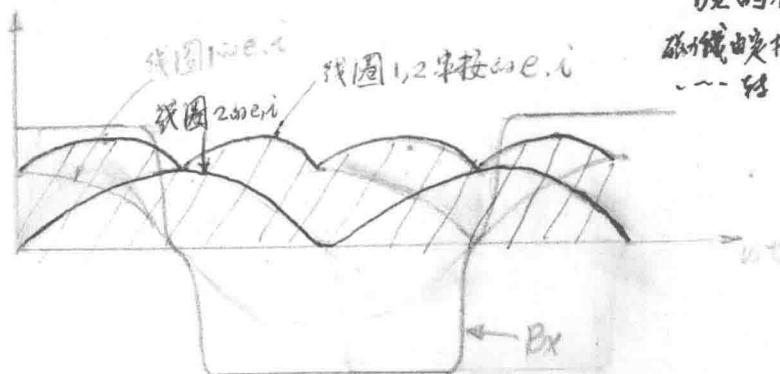
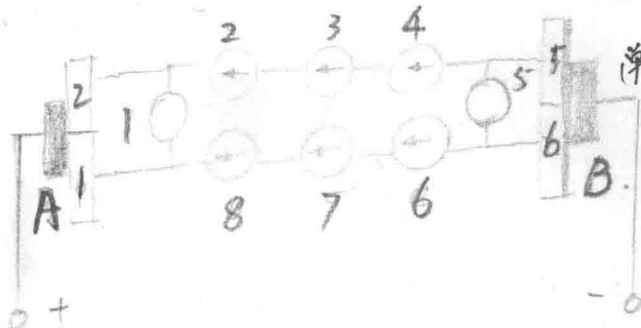
第一节距 $y_1=3$ (短距绕组)
一元件的两侧有效边间距离。
换向器节距 $y_a=1$
一元件两引出端的换向片间
距离

单叠绕组：每个元件两引出端
串联在相邻的两换向片上。

支路数 = 极对数

$2a = 2p$

(单波)



B_x 的符号：
磁通由左指向右 磁通为
正 磁通由右指向左 磁通为
负

- 结论：
1. 只有转子铁心外表气隙导体切割磁力线。
 2. 几何中心线以上的导体均有向右运动分量，以下的导体有向左运动分量。
 3. N极下各导体电势方向相同，S极下各导体电势方向相同。

南京机械高等专科学校备课笔记

4. 被电势^刷经过的线圈应是 $B=0$ 或 $B \approx 0$ 或 B 近似为 0 处;

5. 当线圈^多时, 电刷间引出的电势为恒定直流。

(四). 直流发电机的图形符号。



GB 4728.6-84

(Generator)

IEC 617-6

二. 直流电动机的工作原理。

当 P 的两极电机结构不变, 而

1. 原动机拆去。

2. 两电刷外加直流电源, A 接“+”极, B 接“-”极。(电枢电流不变)

3. 定子磁场保持不变。

则转子^逆时针方向转动: 电能 $\rightarrow$ 机械能。

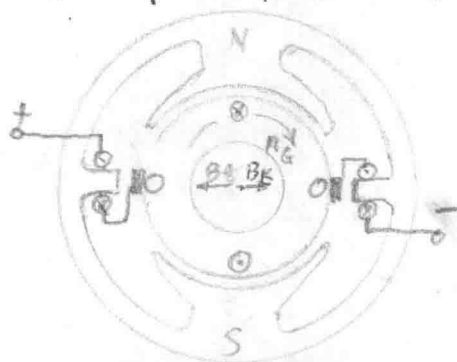
原理: 此时, 线圈中电流与发电机运行时^同相反, N 极面下为[⊗], S 极面下为[⊙]。根据左手定则, 电枢受到^逆时针的电枢转矩, 而^逆时针转动。

三. 直流电机的换向。

当电枢线圈从一条支路切换到另一支路时, 其电流方向发生改变, 这种电流方向的改变过程称为换向。换向通过换向片和电刷的相对运动来完成的。换向不良将引起电刷与换向片间产生有害的火花。火花严重时就烧毁电刷和换向器。换向不良还有电蚀、机械、电化等副作用。

在主磁极间加装换向极可以

改善由电枢反应引起的换向不良。同中换向极的绕组与电枢绕组串联, 其形成的交轴磁场与电枢反应电流的交轴磁场相反, 使换向线圈电势尽可能小。



南京机械高等专科学校备课笔记

四. 直流电机的结构. (P6的图1-6)

直流电机由定子、转子和气隙三大部分组成.

(一) 定子

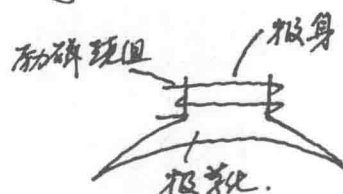
作用: 产生磁场、沟通转子电路, 机械支撑

1. 主磁极

由极身、极靴、励磁绕组组成

励磁绕组通以直流电流 (匝数多, 线径小)

主磁极铁芯由薄钢板或硅钢片叠压, 作为磁路一部分.



2. 换向极:

用以改善换向性能.

3. 机座:

(1) 固定磁极、端盖等.

(2) 作为磁路一部分.

4. 电刷: 使电枢绕组与外电路接通.

由电刷、刷握、压紧弹簧、铜辫辫等组成. (图1-9).

(二) 转子

1. 电枢铁芯: 硅钢片叠压, 有绕组槽, 通风孔和轴孔.

2. 电枢绕组: 多匝, 多线圈串接成闭合回路.

3. 换向器: 相互绝缘的一周换向片, 一个线圈一片.

4. 轴.

5. 风扇: 风冷却.

(三) 气隙

在定、转子间组成的电机磁路中非常重要的气隙磁场.

导线切割磁力线在气隙中进行——实现能量转换.

气隙的大小、对称与否对电机的性能影响很大.

思考: P63的题1和题2.

南京机械高等专科学校备课笔记

§1-2. 直流电机的铭牌数据及主要系列

一. 铭牌数据: 即额定值, 表征电机额定运行情况的各种数据. 它们是用户的主要依据.

1. 额定容量(功率) P_N (KW 或 W)

不管是G还是M, 均指输出功率

2. 额定电压 U_N 单位: V

区别: G — 输出额定功率时的电极使但输出电压

M — 输入到电极绕组的电压.

3. 额定电流 I_N 单位: A

区别: I_G — 允许长期供给负载的电流.

M — 长期运行时, 允许从电源输入的电流

4. 额定转速 n_N : 转/分 — rpm.

P_N, U_N, I_N 关系:

$$G: P_N = U_N I_N.$$

$M: P_N = U_N I_N \cdot \eta_N$ (η_N - 电动机效率).

5. 型号: 表示电机类别规格。

例如:

$$Z_2 - 1 \frac{2}{2}$$
$$\frac{L_2}{1} - \frac{L_1}{1} = \text{第 2 种电极铁芯长度 (长铁芯)}$$

1号机座.

第二次全国统一设计。

有流电机。

6. 励磁方式：励磁电压、励磁电流等。

7. 容许温升: 它等于电机在额定状况下所允许的工作温度减去环境温度的数值 ($^{\circ}\text{C}$)

二. $\dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{z}_3 \mid (v_n) \lesssim P10$

作地: 1-12, 1-13

P42: 2, 3

作为拖动系统选择电机时,应根据额定负载的要求,尽量使电机工作在额定状态下。但如果电机额定电流小于额定电流,称为欠载运行,实际电流大于额定电流,称为过载运行。若长期过载,电机将因过热而损坏。长期欠载,成为大马拉车,运行效率不高,浪费能量。

南京机械高等专科学校备课笔记

§1-3 直流电机的磁场

关于直流电机的磁场,最关心的是实现能量交换处^{的磁场}即气隙磁场。
气隙磁场由两部分合成:主极板磁场、电枢磁场。

(一) 空载磁场

1. 空载: 负载为零 G — 输出功率为零, 电枢电流为零 (他励^{永磁})
 M — 机械输入功率为零, ... 很小 (忽略)。

2. 主极板磁场

- (1) 主磁通 Φ : 主极板产生的通过气隙及定、转子铁芯而闭合的磁通;
- (2) 漏磁通 Φ_{σ} : 不通过电枢而直接进入相邻磁极或磁轭形成闭合回路。
它不与电枢绕组相串联, Φ_{σ} 占约 15~20%。

3. 每极磁通分布: 为右图。

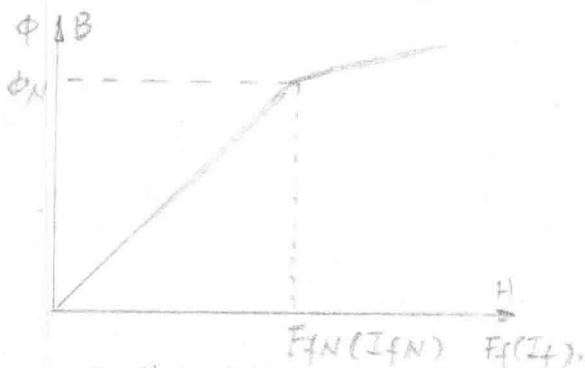
4. 磁化曲线

① 励磁磁势较小时, 磁阻主要由气隙

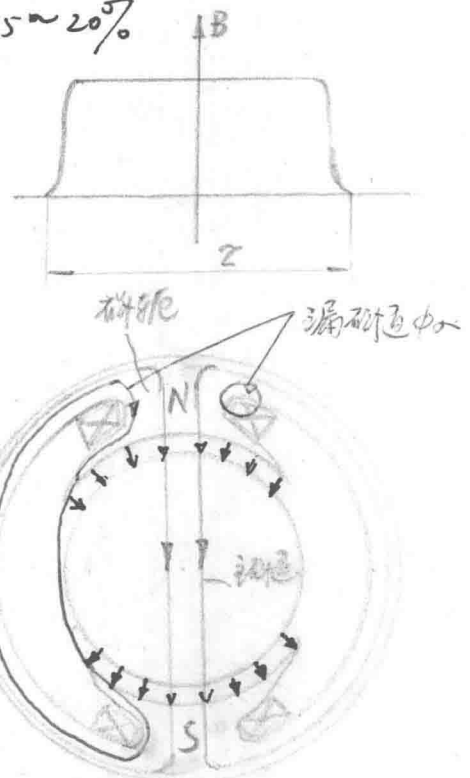
决定。∵ 气隙磁阻, ∴ 磁通中 $\propto F_f$ (励磁磁势)

② 励磁磁势 F_f 大于某一值 (F_{fN}) 时, 使磁路饱和, 此时, F_f 虽多, 但 Φ 很少。

∴ 电机空载运行时, 设计磁化曲线的膝点。



B — 磁通强度
H — 磁场强度 } 磁化曲线



空载磁场

F方向: N-S

南京机械高等专科学校备课笔记

(二) 电枢反应

设电机运行在发电机方式, 当带负载时, I_a 及 Φ 的方向如右图

电枢导体电流方向上 $\otimes$ 下 $\odot$

电枢电流也将气隙中产生磁场。

电枢磁势 F_a 为一正弦波。

电枢磁密 B_a : $\because$ 极靴下气隙相等
磁阻相等, $B_a \propto F_a$; 而极间因磁路增大, 磁阻大为增加, $B_a \propto \frac{1}{r}$ 。

合成 B_a 和 B_{ϕ} (空载磁密) 得到

B_{ϕ} 。

比较 B_{ϕ} 与 B_{ϕ} 得

4. 负载时气隙磁密发生畸变。

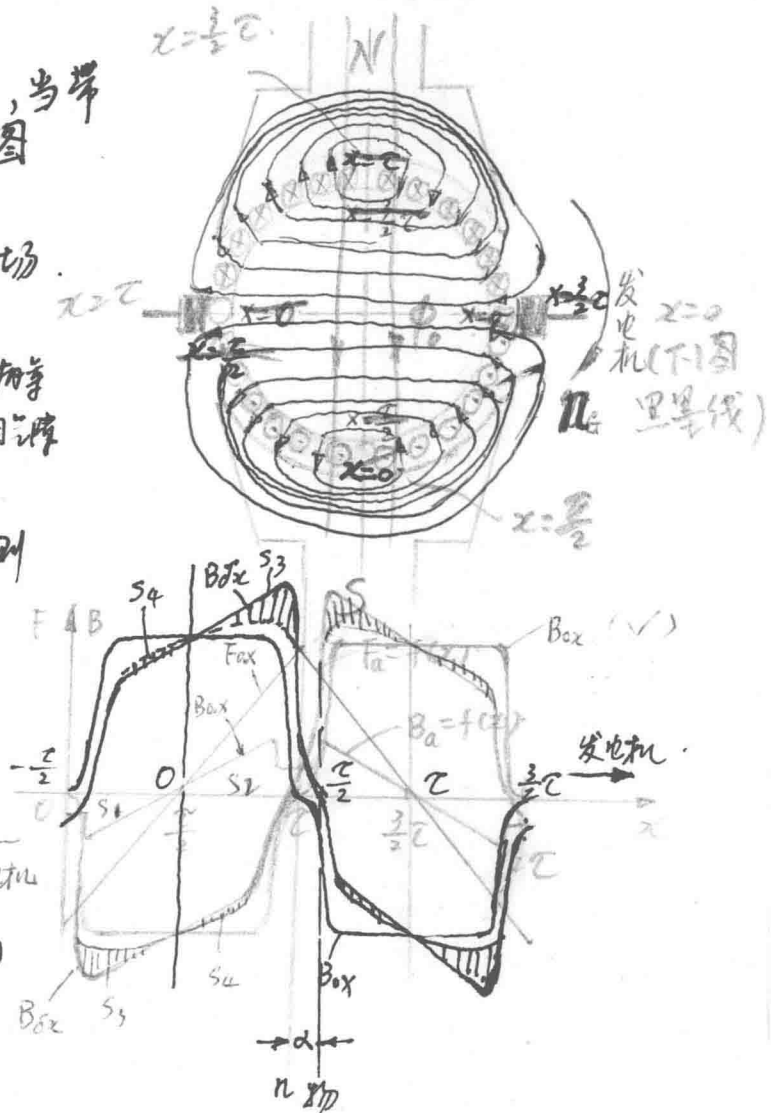
发电机运行: 主磁密的一半被削弱,
(前极尖, 电枢进入磁极) 发电机
另一半被加强。(后极尖, 电枢退出磁极)

物理中性线 (电枢表面上磁密为零位置)
与几何中性线不再重合, 而是顺转向
从几何中心线前移 α 角。

对电动机则相反。

5. 主磁密作用。

$\because S_1 = S_2$, 若磁路不饱和, 主磁密被削弱的数量等于增强的数量。
但实际磁路设计已饱和, 已处于饱和, 再增磁, 磁阻增大很多, 而去磁时,
磁阻减小但不多, 故增加的磁通数小于减少的磁通数 (图中 $S_4 < S_3$)。
使负载时每极磁通比空载时要减少。



$$\Phi = \frac{F}{R_m} \quad \begin{array}{l} F - \text{磁势} \\ R_m - \text{磁阻} \end{array}$$

南京机械高等专科学校备课笔记

§1-4. 直流电机电枢电势和电枢转矩的计算.

直流电机无论是作电动机运行还是作发电机运行,电枢绕组都要感应电势,也会产生电枢转矩(电枢绕组有电流时).
感应电势和电枢转矩的计算公式在电机应用中占有非常重要的位置.

一. 电枢电势 E_a .

例如:电动机运行,以 n 转/分顺时针转.
则电枢导体切割气隙磁场 $\rightarrow$ 感应电势.

x 处一根导体: $e_x = B_x l v_a$.

其中电枢旋转线速度 $v_a = \frac{\pi D_a \cdot n}{60}$

dx 处的导体数: $\frac{N}{\pi D_a} dx$

dx 处导体(同极面下)串联电势

$$de = e_x \cdot \frac{N}{\pi D_a} dx.$$

$$= B_x l \cdot \frac{\pi D_a n}{60} \cdot \frac{N}{\pi D_a} dx$$

$$= \frac{N}{60} n B_x l dx.$$

每极串联电势 $e_z = \int_0^\tau \frac{N}{60} n B_x l dx$

$$= \frac{N}{60} n \int_0^\tau B_x l dx$$

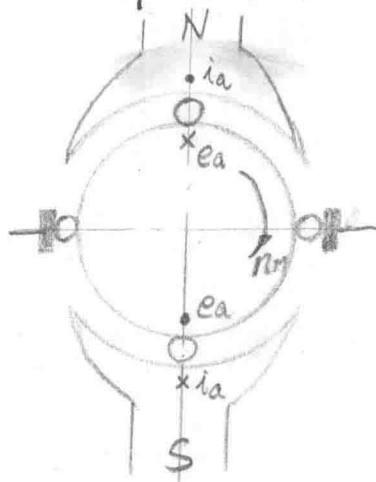
$$= \frac{N}{60} n \phi \quad (\phi - \text{每极磁通}) \quad \phi = \int_0^\tau B_x l dx$$

环路电势: $2p e_z$, 而支路数为 $2a$ (单叠绕组 $p=a$)

电枢电势(电刷两端) $E_a = \text{支路电势} = \frac{2p e_z}{2a} = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} n \phi$

$$= \frac{pN}{60a} n \phi$$

$$= C_e \phi n.$$

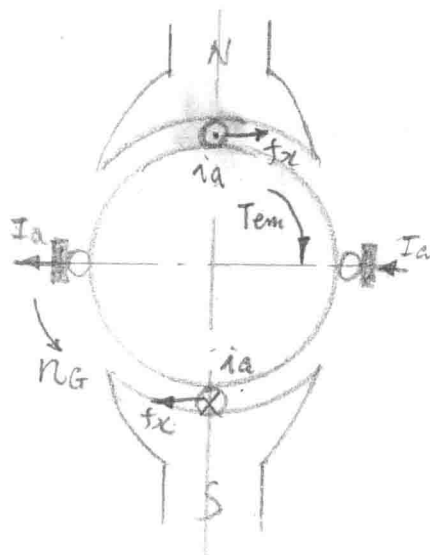


南京机械高等专科学校备课笔记

其中电势常数 $C_e = \frac{pN}{60a}$.

二. 电磁转矩 T_{em} .

设发电运行的二极电机 G
接上负载后, 有电枢电流 I_a
(电枢电流 i_a), i_a 与气隙磁
场作用产生电磁力, 即形成
电磁转矩 T_{em}



1. 一根导体的电磁力 f_x .

$$f_x = B_x l i_a \quad i_a = \frac{I_a}{a}$$

i_a - 支路电流. $\wedge$ 单叠绕组支路数 $2a = 2p$
 B_x - 导体所处处的磁密.

2. 一根导体所受的电磁转矩 T_x .

$$T_x = f_x \cdot \frac{D_a}{2} = B_x l i_a \frac{D_a}{2}$$

3. $d\alpha$ 弧内各导体产生的电磁转矩 (均为同方向) dT

$$\begin{aligned} dT &= T_x \cdot \frac{N}{\pi D_a} d\alpha = B_x l i_a \frac{D_a}{2} \cdot \frac{N}{\pi D_a} d\alpha \\ &= \frac{N}{2\pi} i_a B_x l d\alpha \\ &= \frac{N}{4\pi a} I_a B_x l d\alpha \end{aligned}$$

4. 一个极距内导体电磁转矩 T_τ

$$T_\tau = \int_0^\tau dT = \int_0^\tau \frac{N}{4\pi a} I_a B_x l d\alpha = \frac{N}{4\pi a} I_a \phi$$

5. 总电磁转矩 T_{em}

$$T_{em} = 2p T_\tau = 2p \frac{N}{4\pi a} I_a \phi = \frac{pN}{2\pi a} I_a \phi = C_T I_a \phi$$

$$T_{em} = C_T I_a \phi$$

$$T_{em} = N m$$

南京机械高等专科学校备课笔记

$$C_T = \frac{pN}{2\pi a} = \frac{pN}{60a} \cdot \frac{60}{2\pi} = 9.55 C_e.$$

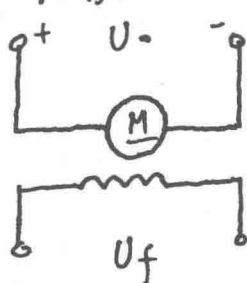
作业：题 4 和 补充题 1 (见反面补充题 2)

§1-5. 直流电动机的运行原理.

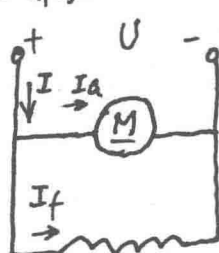
一. 直流电动机的励磁方式.

对励磁绕组的供电方式称为励磁方式.

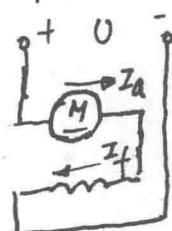
1. 他励



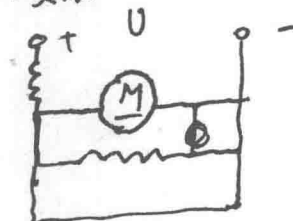
2. 并励



3. 串励



4. 复励



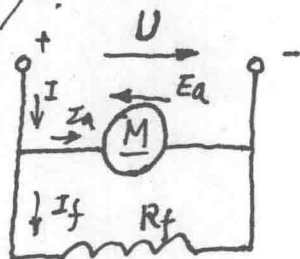
二. 直流电动机的基本平衡方程式 (并励).

1. 电压平衡方程式

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

$$= E_a + I_a R_a.$$

$$U = I_f R_f.$$



式中 r_a — 电枢绕组电阻.

R_a — 包括电刷接触电阻在内的电枢总电阻.

$2\Delta U_b$ — 一对电刷总接触电压降. (与 I_a 大小无关. 与电刷材料有关)

关: 石墨电刷. $\Delta U_b = 1V$. 合金石墨电刷. $\Delta U_b = 0.3V$.

R_f — 励磁绕组电阻.

I_f — 励磁电流, A;

$I = I_a + I_f$

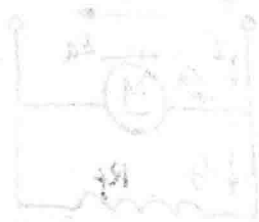
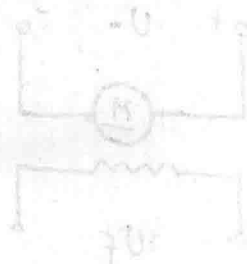
南京邮电大学高等数学

补充题：一台四极直流发电机，单叠整距电枢绕组，每极磁通 $\Phi = 3.5 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ ，总导体数 $N = 152$ 。

求：(1) 转速为 1200 rpm 时的空载电势 E_a ；

(2) 每支路电流 $I_a = 50 \text{ A}$ 时的机电转换转矩 T_{em} 。

(提示：单叠绕组 $2p = 2a$)



$$E_a - I_a R_a = U$$

$$E_a = U + I_a R_a$$

$$U = 110 \text{ V}$$

电枢回路电压平衡方程

电枢回路欧姆定律

电枢回路电压平衡方程

电枢回路电压平衡方程

电枢回路电压平衡方程

电枢回路电压平衡方程

$$25 + 2I = 1$$

南京机械高等专科学校备课笔记

二、功率平衡方程式

并励直流电动机

输入功率 $P_1 = UI = U(I_a + I_f)$

$$= (E_a + I_a r_a + 2\Delta U_b) I_a + U I_f$$

$$= \cancel{P_{em}} E_a I_a + I_a^2 r_a + 2\Delta U_b I_a + U I_f$$

$$= \underline{P_{em}} + p_{cu a} + p_{cu b} + p_{cu f}$$

电磁功率 $\underline{P_{em}} = E_a I_a = C_e \phi n I_a$

$$= \frac{pN}{60a} \phi n I_a = \frac{pN}{2\pi a} \phi I_a \cdot \frac{2\pi n}{60}$$

$$= C_T \phi I_a \Omega = T_{em} \Omega$$

P_{em} 要减去以三种损耗才是输出功率 P_2 。

(1) 铁心损耗 p_{Fe} : 电枢铁心在磁场中旋转切割磁力线而引起的磁滞损耗和涡流损耗。 $p_{Fe} \propto B$ 和转速。

(2) 机械损耗 p_{Ω} : 摩擦损耗 (电刷, 转子/空气), 通风损耗。均与转速有关。

(3) 附加损耗 p_{Δ} : 齿槽存在, 气隙磁通脉动, 左右摇摆引起铁损耗。及换向电流铜耗等。 $p_{\Delta} \approx 0.005 \sim 0.01 P_N$ 。

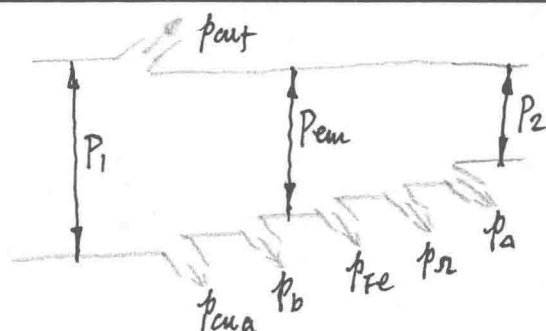
$$\therefore P_{em} = P_2 + p_{Fe} + p_{\Omega} + p_{\Delta}$$

$$= \underset{\text{空载损耗}}{P_2} + p_0 + p_{\Delta}$$

式中 $p_0 = p_{Fe} + p_{\Omega}$ 。之所以成立是由于从空载变化到额定负载时, 电机转速 n 基本不变。

$$\therefore P_1 = P_2 + p_{Fe} + p_{\Omega} + p_{\Delta} + p_{cu a} + p_{cu b} + p_{cu f}$$

南京机械高等专科学校备课笔记



三、转矩平衡方程式

当电动机以恒转速旋转时，作用于电动机上的合转矩应为零。即，原动转矩 T_{em} 与反转矩（负载转矩 T_2 和空载转矩 T_0 ）大小相等，方向相反。即

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

此式也可以从功率平衡关系式导出

$$P_{em} = P_2 + p_0 \quad (\text{忽略 } p_\Delta)$$

同除 Ω ，即得

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

其中

$$T_2 = P_2 / \Omega \quad \text{— 输出转矩}$$

$$T_0 = p_0 / \Omega \quad \text{— 空载...}$$

三、直流电动机工作特性：

工作特性：当 $U = U_N$ ， $I_f = I_{fN}$ ，转子电路不串电阻时。

$$n, T_{em}, \eta = f(P_2)$$

由于 P_2 为机械功率不易测量， I_a 易得，且 I_a 随 P_2 增大且增加趋势相似。

$$\therefore n, T_{em}, \eta = f(I_a)$$

测工作特性的实验电路如下及例示

（一）转速特性： $U = U_N$ ， $I_f = I_{fN}$ 时 $n = f(I_a)$

$$\therefore U_N = E_a + I_a R_a \quad \text{而 } E_a = C_e \phi_N n$$

南京机械高等专科学校备课笔记

$$\therefore n = \frac{U_N}{C_e \Phi_N} - \frac{R_a}{C_e \Phi_N} I_a.$$

$$= n_0 - \beta I_a.$$

式中, $n_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi}$ — 理想空载转速. $I_a=0$ 时转速

并不存在。

$\beta = R_a / C_e \Phi_N$ — 直线斜率

所以若不考虑电枢反应时, 转速特性是一条略为下弯的直线

($\because U_N \gg I_a N R_a$)

(二) 转矩特性: $T_{em} = f(P_2)$.

$$\therefore T_{em} = T_2 + T_0.$$

$$T_2 = P_2 / \Omega.$$

$\therefore$ 当忽略电枢反应时, n 或 Ω 基本不变.

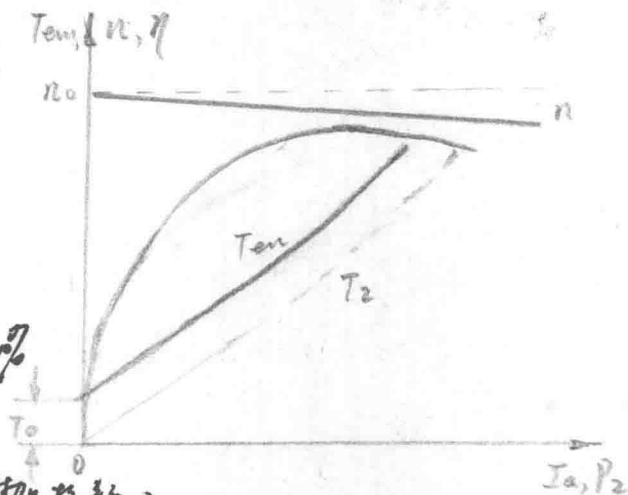
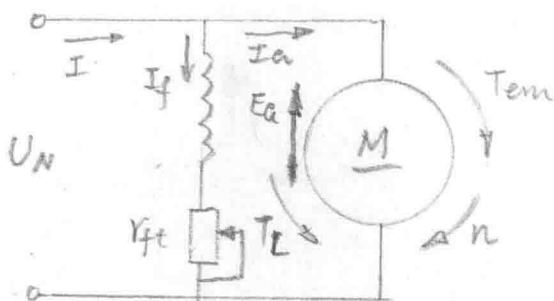
$\therefore T_2 \propto P_2$. 作此直线, 再加 T_0

$$\text{即得 } T_{em} = f(P_2)$$

(三) 效率特性 $\eta = f(I_a)$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% = \left(1 - \frac{\Sigma p}{P_1}\right) \times 100\%$$

$$= \left[1 - \frac{p_{Fe} + p_{\Sigma} + p_{\text{mech}} + I_a^2 R_a + 2\Delta U_b I_a}{U(I_a + I_f)}\right] \times 100\%$$



其中 Σp 表示各种损耗之和。(忽略附加损耗).

$\because U = U_N, I_f = I_{fN} \therefore p_{Fe}, p_{\Sigma}$ 和 p_{mech} 均为不变损耗 (中, n 变化很小)

而转子铜耗 $I_a^2 R_a$ 和电刷损耗 $2\Delta U_b I_a$ 随 I_a 而变.

从 $\eta = f(I_a)$ 可见, η 是 I_a 的二次曲线. 通过求导并令 $d\eta/dI_a = 0$. 可得 $\eta_{\max}$ 条件.