

第5篇 直流电机

第18章 直流电机的基本工作原理和结构

▼ 学习目标

- 理解直流电机的基本工作原理
- 了解直流电机的基本结构
- 熟练掌握直流电机的额定值

第18章 直流电机的基本工作原理和结构

18.1 直流电机的用途和基本工作原理

1. 直流电机的用途

- 直流发电机
 - 曾用做励磁、电解、电镀、充电、电焊等的电源。
- 直流电动机
 - 优点：调速范围宽、精度高、平滑性好，调节方便；过载能力强，起动、制动性能好。
 - 特别适合用于高性能电气传动系统和有特殊性能要求的自动控制系统。

► 直流电机的缺点
有换向器 → 结构复杂、成本高；容量、转速受限。

18.1 直流电机的用途和基本工作原理

2. 直流电机的基本工作原理

参见习题8-18

► 对比：旋转电枢式交流发电机的基本工作原理

- 集电环1、2分别与线圈边 ab 、 cd 相联。
- 电刷A、B分别与集电环1、2接触。
- 线圈旋转时，电刷A、B间得到交流电动势。

2. 直流电机的基本工作原理

► 直流发电机的基本工作原理

电刷位于磁极中心线。线圈边 ab 、 cd 分别联至两个换向片。各换向片构成换向器。

通过换向器，电枢绕组内的交流电动势变换为外部电路（电刷两端所联结的电路）中的直流电动势。

2. 直流电机的基本工作原理

■ 减小电动势脉动

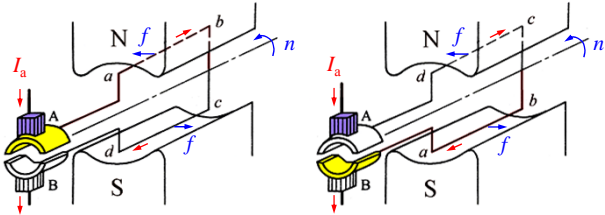
假设气隙磁场正弦分布，不计换向片间隙和电刷宽度。

一个线圈时，正、负电刷间得到的直流电动势有很大的脉动。

- 增加线圈数量，可减小电刷间直流电动势的脉动。
- 另一途径：改善气隙磁场分布波形。

2. 直流电机的基本工作原理

直流电动机的工作原理



在电刷 A、B 间加直流电压，产生直流电流 I_a 。
用左手定则，判断线圈边 ab 、 cd 上电磁力 f 的方向。

通过换向器，外部电路的直流电流变换为电枢绕组内的交流电流，电动机产生方向不变的电磁转矩。

2. 直流电机的基本工作原理

直流电机的基本工作原理 —— 小结

- 直流电机 —— 实现机械能与直流电能的相互转换。
- 直流电机和同步电机一样，都采用直流励磁，均有磁极（磁极铁心+励磁绕组）和电枢绕组。
- 励磁绕组通以直流励磁电流，建立气隙磁场；电枢绕组产生感应电动势或通以电流产生电磁转矩。
- 直流电机实质上是一台装有换向装置的交流电机。
- 换向装置的作用

电枢绕组内	直流发电机	外部电路
交流感应电动势	→	直流电动势
交流电流	←	直流电流
	直流电动机	

第18章 直流电机的基本工作原理和结构

18.2 直流电机的主要结构

定子

- 主极
 - 主极铁心：低碳钢片叠成。
 - 励磁绕组：通以直流电流，建立主磁通。
- 换向极
 - 换向极铁心
 - 换向极绕组
- 机座：是磁路的一部分（机座磁轭）；并起机械支撑作用。
- 电刷装置：用于引入或引出直流电流。

18.2 直流电机的主要结构

转子

- 电枢铁心：0.5mm厚硅钢片叠成；是主磁路的一部分，并嵌放电枢绕组。
- 电枢绕组：铜导线制成；产生感应电动势和流过电流，实现机电能量转换。
- 换向器：实现交、直流电间的变换。
- 转轴

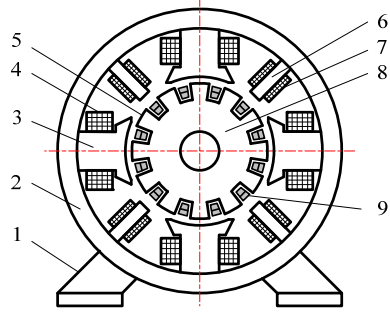
气隙

定子主极和电枢之间的间隙，是主磁路的重要组成部分。

通常，功率大的电机，气隙长度也较大。

18.2 直流电机的主要结构

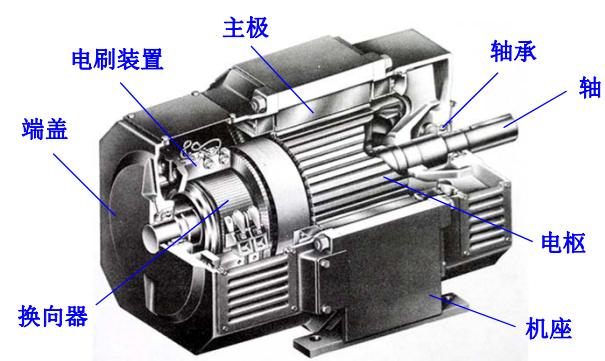
4极直流电机的截面示意图



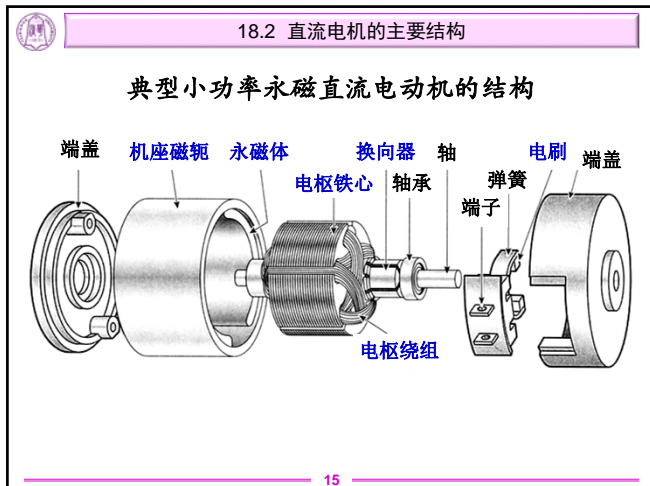
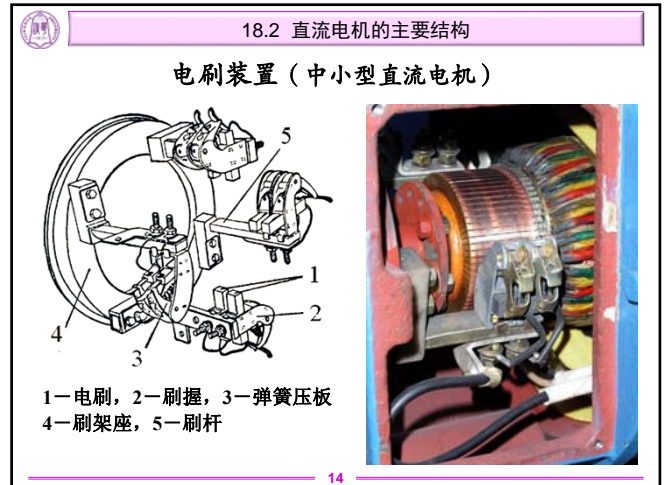
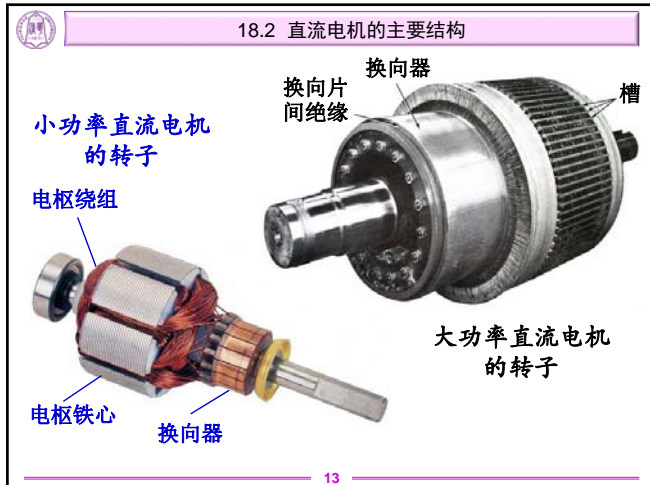
- 1—底脚
- 2—机座
- 3—主极铁心
- 4—励磁绕组
- 5—电枢齿
- 6—换向极铁心
- 7—换向极绕组
- 8—电枢铁心
- 9—电枢绕组

18.2 直流电机的主要结构

直流电机的结构



主极、电刷装置、端盖、换向器、轴承、轴、电枢、机座



第18章 直流电机的基本工作原理和结构

18.3 直流电机的额定值

- 额定功率 P_N (kW)
电机在铭牌规定的额定工况下运行时的输出功率。
 - ◆ 发电机: 电机出线端输出的电功率;
 - ◆ 电动机: 转轴输出的机械功率。
- 额定电压 U_N (V)
电机在额定工况下电机出线端的电压。
 - ◆ 直流电机的额定电压通常不高。
 - ◆ 我国中小型直流电动机的额定电压一般为110V、220V、440V, 直流发电机为115V、230V、460V; 大型直流电机的额定电压一般为800V左右。

16

18.3 直流电机的额定值

- 额定电流 I_N (A)
电机在额定电压下运行, 输出功率为额定功率时, 电机出线端的电流。
- 额定转速 n_N (r/min)
电机在额定电压下运行, 输出功率为额定功率时, 转子的转速。
- 额定励磁电流 I_{fN} (A)
电机运行在额定工况时, 励磁绕组中的直流电流。
- 额定效率 η_N
电机额定运行时, 输出功率 (即额定功率 P_N) 与输入功率 (即额定输入功率 P_{iN}) 之比的百分值。

17

18.3 直流电机的额定值

额定功率、额定电压、额定电流间的关系

例18-1 一台直流发电机, 额定功率 $P_N=145\text{kW}$, 额定电压 $U_N=230\text{V}$, 额定效率 $\eta_N=90\%$, 求该电机的额定输入功率 P_{iN} 和额定电流 I_N 。

解: 额定输入功率 (机械功率) 为

$$P_{iN} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{145}{0.9} = 161.1 \text{ kW}$$

额定电流为

$$I_N = \frac{P_N}{U_N} = \frac{145 \times 10^3}{230} = 630.4 \text{ A}$$

18



18.3 直流电机的额定值

额定功率、额定电压、额定电流间的关系 (续)

例18-2 一台直流电动机的额定值为: $P_N=160\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $n_N=1500\text{r/min}$, $\eta_N=90\%$, 求该电机的额定输入功率 P_{1N} 、额定电流 I_N 和额定输出转矩 T_{2N} 。

解:

$$P_{1N} = \frac{P_N}{\eta_N} = \frac{160}{0.9} = 177.8 \text{ kW}$$

$$I_N = \frac{P_{1N}}{U_N} = \frac{177.8 \times 10^3}{220} = 808.2 \text{ A}$$

$$T_{2N} = \frac{P_N}{\Omega_N} = \frac{60P_N}{2\pi n_N} = \frac{60 \times 160 \times 10^3}{2\pi \times 1500} = 1019 \text{ N} \cdot \text{m}$$

19



第18章 直流电机的基本工作原理和结构

小 结

- ✓ 直流电机 (发电机、电动机) 的基本工作原理。
- ✓ 直流电机的基本结构。
- ✓ 直流电机的额定值。
- ✓ 主要概念

换向器, 换向片, 电刷 (装置)

主极, 励磁绕组, 电枢, 电枢绕组

额定值

20



第5篇 直流电机

第19章 直流电机的运行原理

▼ 学习目标

- 直流电机电枢绕组的主要特点
- 直流电机的励磁方式, 电枢反应性质
- 直流电机的电枢电动势和电磁转矩公式
- 发电机惯例、电动机惯例; 直流发电机、电动机的基本方程式 (电动势、功率、转矩的平衡方程式); 判断直流电机运行状态的方法

21

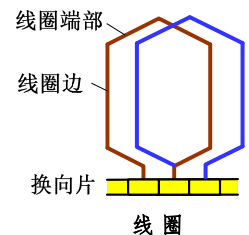


第19章 直流电机的运行原理

19.1 直流电机的电枢绕组

1. 电枢绕组的构成

- 由结构相同的线圈组成; 线圈节距等于或接近极距 τ_p 。
- 线圈由线圈边和线圈端部组成, 首、末端和不同的换向片联结。
- 同一换向片既联一个线圈的首端, 又联另一线圈的末端。
- 各线圈通过换向片, 按一定规律联成一个闭合回路。



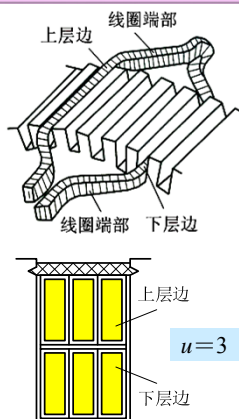
22



1. 电枢绕组的构成

- 每个槽内放置两层线圈边。每个线圈的一个线圈边放在槽的上层, 称为上层边; 另一线圈边放在另一槽的下层, 称为下层边。
- 实际直流电机中, 常在每槽上、下层放置多个线圈边。

虚槽数 $Q_u = u \times \text{实际槽数 } Q$



23



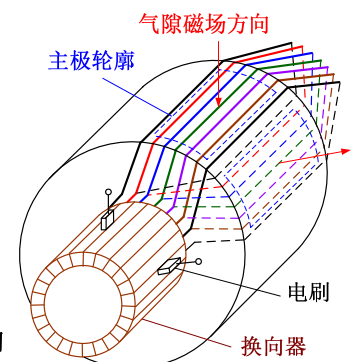
19.1 直流电机的电枢绕组

2. 单叠绕组

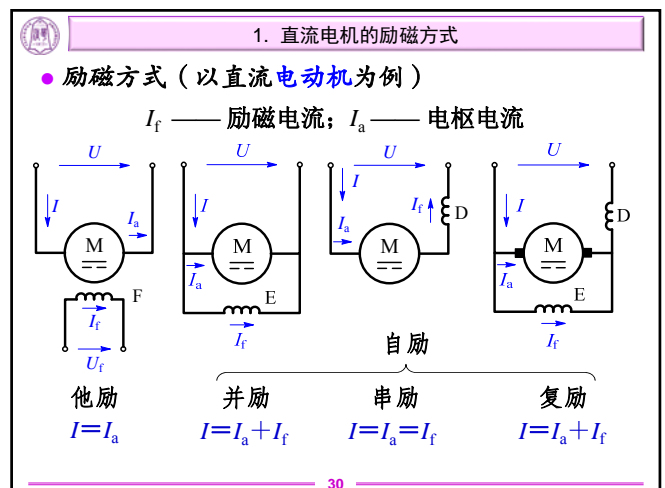
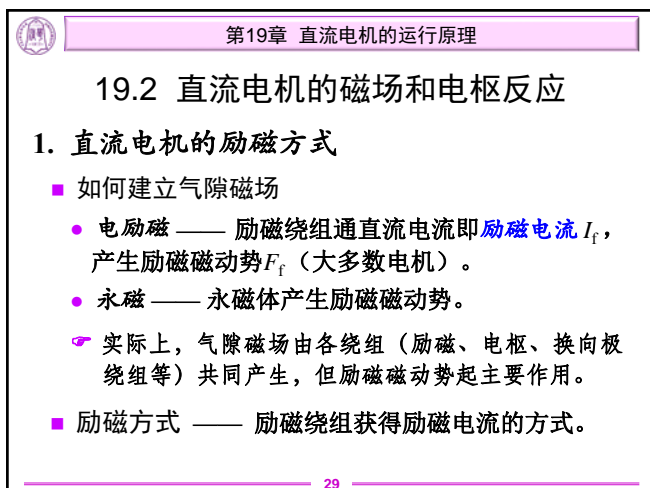
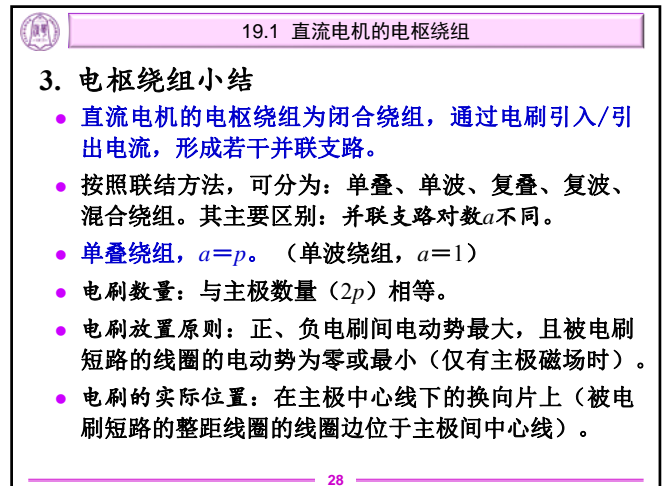
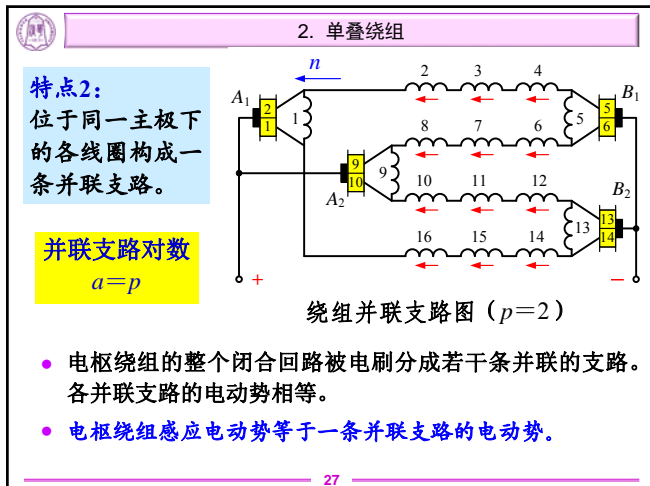
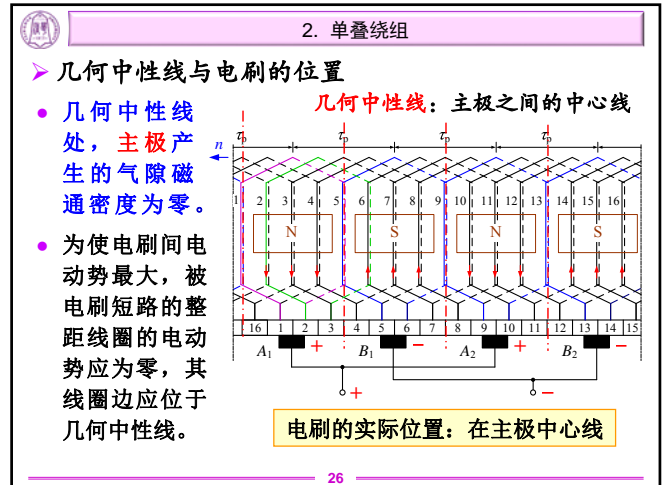
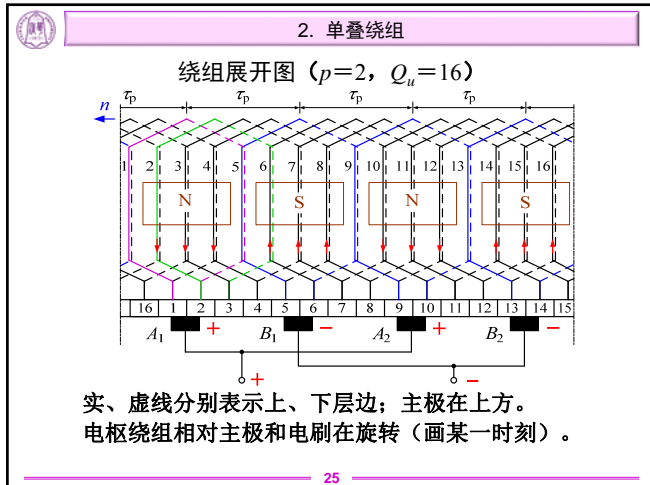
特点1:

每个线圈的首、末端联在相邻的两个换向片上。

单叠绕组联结示意图



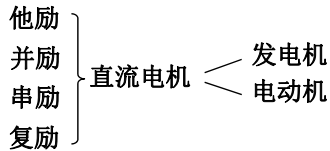
24





1. 直流电机的励磁方式

- 直流电机按励磁方式的分类
- 励磁方式对直流电机的运行特性有重要影响。
- 直流电机有多种分类方法。其中最重要的是按励磁方式的分类：



31



19.2 直流电机的磁场和电枢反应

2. 励磁磁动势产生的气隙磁场

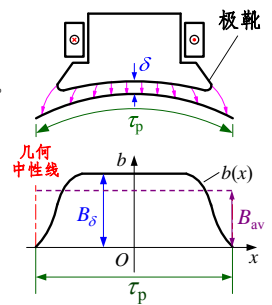
空载 ($I_a=0$) 时, 气隙磁场由励磁磁动势 F_f 产生。

➤ 气隙磁场分布

- 不计齿槽影响, 可得 F_f 产生的气隙磁通密度的分布曲线 $b(x)$ 。
- 气隙磁通密度值取决于气隙大小; 几何中性线处, F_f 产生的气隙磁通密度为零。
- 每极磁通量 (每极主磁通)

$$\Phi = B_{av} \tau_p l_e$$

B_{av} —— 气隙磁通密度平均值



32

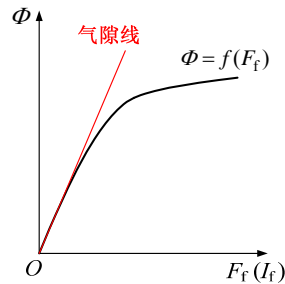


2. 励磁磁动势产生的气隙磁场

➤ 磁化特性

表示 Φ 与 F_f (或 I_f) 间的数量关系。

- 每极磁通量 Φ 随 F_f 或 I_f 变化的关系 $\Phi=f(F_f)$ 或 $\Phi=f(I_f)$, 称为电机的磁化特性。
- 直流电机的磁化特性也具有饱和的特点。



33



19.2 直流电机的磁场和电枢反应

3. 电枢反应

(1) 电枢反应的定义

- 电枢绕组流过电枢电流 I_a 时, 产生电枢磁动势 F_a 。此时, 气隙磁场由 F_f 和 F_a 二者的合成磁动势产生。
- F_a 使气隙磁动势的分布发生变化, 从而使气隙磁场 (气隙磁通密度的大小与分布) 改变。
- 电枢磁动势 F_a 对主极 (励磁磁动势) 产生的气隙磁场的影响, 称为电枢反应。
- 电枢电流沿电枢圆周的分布与电刷位置有关, 因此, 电枢反应性质与电刷位置有关。

34

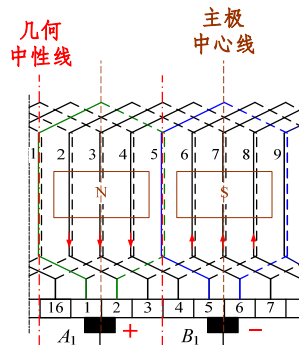


3. 电枢反应

(2) 电刷位于几何中性线时的电枢反应

➤ 什么是“电刷位于几何中性线”

- 电刷的实际位置, 通常在主极中心线下的换向片上。
- 线圈端部对称时, 被电刷短路的整距线圈的两个线圈边恰好位于几何中性线上的电枢槽内。



35



(2) 电刷在几何中性线上时的电枢反应

➤ 什么是“电刷位于几何中性线” (续)

- 画示意图时, 省略换向片, 让电刷位于几何中性线, 直接与被短路的线圈边接触。

实际电机

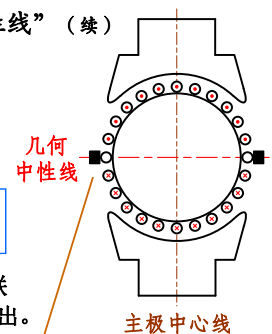
电刷位于
主极中心线

示意图

电刷位于
几何中性线

- 任何型式的电枢绕组, 各并联支路电流都通过电刷引入/引出。

电刷是电枢表面电流分布 (沿圆周) 的分界线。



36

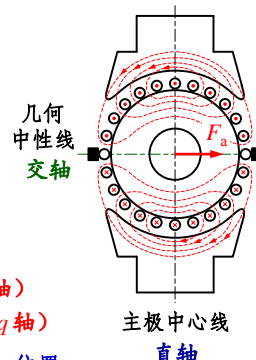
(2) 电刷位于几何中性线时的电枢反应

➤ 电枢磁动势的基本特点

- 电枢电流的分布以电刷轴线为分界线。
- 电枢磁动势 F_a 在空间是静止的, 其轴线(最大值位置)始终与电刷轴线重合。

■ 直轴、交轴的定义

- 以主极中心线为直轴 (d 轴)
- 主极间的中心线为交轴 (q 轴)
- 几何中性线在交轴 (q 轴) 位置。



几何中性线 交轴

主极中心线 直轴

37

(2) 电刷位于几何中性线时的电枢反应

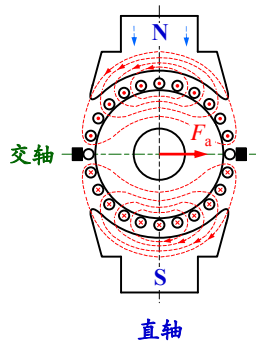
➤ 交轴电枢反应的性质

- 电刷位于几何中性线时, F_a 是交轴电枢反应磁动势。
- 交轴电枢反应磁动势 F_{aq} , 在一半极下对主极磁场起去磁作用, 在另一半极下则起增磁作用。

↓

气隙磁场不再关于 d 轴对称分布。

($I_a=0$ 时, 主极磁场关于 d 轴对称分布)



交轴

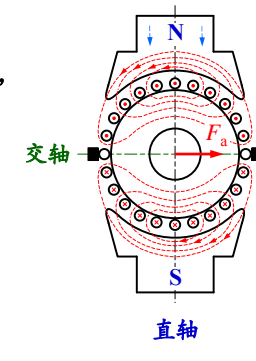
直轴

38

(2) 电刷位于几何中性线时的电枢反应

➤ 交轴电枢反应的性质 (续)

- F_{aq} 使气隙磁场发生畸变, 几何中性线处的气隙磁通密度不等于零。
- 磁路线性时, 去、增磁作用相抵, ϕ 不变。
- 磁路饱和时, 有一定去磁作用, 使 ϕ 减小。



交轴

直轴

39

第19章 直流电机的运行原理

19.4 电枢绕组的感应电动势和电磁转矩

1. 电枢绕组的感应电动势

- 电枢绕组切割气隙磁场而产生的电动势 E_a , 简称电枢电动势, 是正、负电刷间的平均感应电动势。
- E_a 等于电枢绕组一条并联支路的平均感应电动势, 即一条支路中所有串联导体的平均感应电动势之和。

➤ 电枢电动势公式的推导

推导方法:

一根导体的平均感应电动势 \times 一条支路的导体总数

40

1. 电枢绕组的感应电动势

➤ 电枢电动势公式的推导 (续)

设电枢线圈为整距, 电刷实际位置在主极中心线上。电枢绕组一根导体中的平均感应电动势为

$$e_{av} = B_{av} l_e v = B_{av} l_e \frac{n}{60} 2\pi r_p$$

设电枢绕组总导体数为 z , 则一条并联支路导体数为 $\frac{z}{2a}$

$$E_a = \frac{z}{2a} e_{av} = \frac{z}{2a} B_{av} l_e \frac{n}{60} 2\pi r_p$$

$$\Phi = B_{av} \tau_p l_e \Downarrow$$

$$E_a = C_e \Phi n$$

电动势常数 $C_e = \frac{pz}{60a}$

41

1. 电枢绕组的感应电动势

➤ 讨论

- 电枢电动势 E_a 与每极磁通量 Φ 和转速 n 的乘积成正比。
 - 当 Φ 不变时, E_a 与 n 成正比;
 - 当 n 一定时, E_a 与每极磁通量 Φ 成正比, 与气隙磁通密度分布情况无关。
- 负载运行时, $E_a = C_e \Phi n$ 仍成立, 此时 Φ 应为负载时的值, 而不是仅由 F_f 产生的气隙磁通。
- 线圈是短距时, E_a 会略有降低。实际电机短距较小, 故通常不计其影响。

42



19.4 电枢绕组的感应电动势和电磁转矩

2. 电枢绕组的电磁转矩

- 电枢绕组通以电流, 产生电磁转矩 T 。
- T 是电枢绕组所有导体产生的平均电磁转矩之和。

► 电磁转矩公式的推导

推导方法:

一根导体的平均电磁力 \times 电枢半径 \times 导体总数

仍设电枢线圈为整距, 电刷实际位置在主极中心线。

设一根导体中的电流为 i_a , 它产生的平均电磁力为

$$f_{av} = B_{av} l_e i_a$$

43



2. 电枢绕组的电磁转矩

► 电磁转矩公式的推导 (续)

产生的平均电磁转矩为

$$t_{av} = f_{av} \frac{D}{2} = B_{av} l_e i_a \left(\frac{2p\tau_p}{\pi} \frac{1}{2} \right) = \frac{p}{\pi} B_{av} \tau_p l_e i_a$$

$$T = \sum_{i=1}^z t_{av} = z t_{av} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Phi = B_{av} \tau_p l_e \\ i_a = \frac{I_a}{2a} \end{array} \right.$$

$$T = C_T \Phi I_a$$

转矩常数

$$C_T = \frac{pz}{2\pi a}$$

对已制成的电机, C_T 和 C_e 都是常数, 且 $C_T = \frac{60}{2\pi} C_e$ 。

44



2. 电枢绕组的电磁转矩

► 讨论

- 电磁转矩 T 与每极磁通量 Φ 和电枢电流 I_a 的乘积成正比。
- $T = C_T \Phi I_a$ 中的 Φ 是由 F_f 和 F_a 共同产生的气隙磁通。
- 线圈短距会使 T 会略有降低, 但通常忽略不计。

45



第19章 直流电机的运行原理

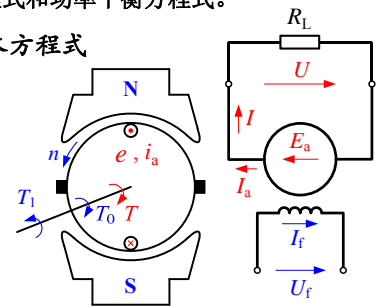
19.5 直流电机的基本方程式

直流电机稳态运行时的基本方程式包括: 电动势平衡方程式、转矩平衡方程式和功率平衡方程式。

1. 直流发电机的基本方程式

► 发电机惯例

- 向负载侧看, U 与 I 同向。
- E_a 与 I_a 同向。
- 电磁转矩 T 与 n 反向, 是制动性转矩。



46



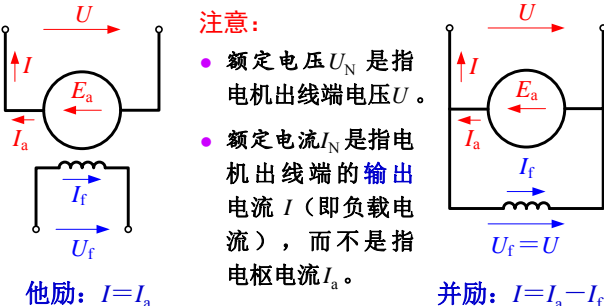
1. 直流发电机的基本方程式

► 电流关系

与励磁方式有关。

注意:

- 额定电压 U_N 是指电机出线端电压 U 。
- 额定电流 I_N 是指电机出线端的输出电流 I (即负载电流), 而不是指电枢电流 I_a 。



他励: $I = I_a$

并励: $I = I_a - I_f$

47



1. 直流发电机的基本方程式

(1) 电动势平衡方程式

他/并励直流发电机电枢回路的电动势平衡方程式 (按发电机惯例)

$$E_a = U + I_a R_a$$

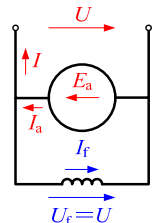
R_a ——电枢回路总电阻。

$I_a R_a$ ——电枢回路的总电阻压降, 包括:

- 电枢绕组电阻上的压降;
- 电刷与换向器接触电阻上的压降。

通常不考虑接触电阻随 I_a 的变化, 即认为 R_a 不变。

结论: 直流发电机, $E_a > U$ 。



48

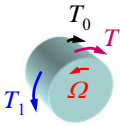
1. 直流发电机的基本方程式

(2) 转矩平衡方程式

以转子上各转矩的实际方向作为其参考方向, 则

$$T_1 = T + T_0$$

- 发电机的输入转矩 T_1 (即原动机的拖动转矩) 等于电磁转矩 T 与空载转矩 T_0 之和 (T 和 T_0 都是制动性转矩)。
- $T_1 > T$, 发电机的转向取决于 T_1 的方向。
- 空载转矩 T_0 对应空载损耗 p_0 (包括: 机械损耗 p_m 、铁耗 p_{Fe} 、附加损耗 p_{ad})。



49

1. 直流发电机的基本方程式

(3) 功率平衡方程式

描述稳态运行时电枢的功率平衡关系。

在 $T_1 = T + T_0$ 两边同乘机械角速度 Ω , 得

$$T_1 \Omega = T \Omega + T_0 \Omega$$

$$P_1 = P_{em} + p_0$$

其中, 输入功率 $P_1 = T_1 \Omega$

电磁功率 $P_{em} = T \Omega$

空载损耗 $p_0 = T_0 \Omega = p_m + p_{Fe} + p_{ad}$

50

(3) 功率平衡方程式

在 $E_a = U + I_a R_a$ 两边同乘电枢电流 I_a , 得

$$P_{em} = E_a I_a = (U + I_a R_a) I_a$$

对并励直流发电机, $I_a = I + I_f$, 代入上式得

$$P_{em} = P_2 + p_{Cu} + p_f$$

P_2 —— 发电机的输出功率 (电功率), $P_2 = UI$;

p_{Cu} —— 电枢回路的铜耗, $p_{Cu} = I_a^2 R_a$;

p_f —— 励磁回路的铜耗, $p_f = U_f I_f = UI_f = I_f^2 R_f$ 。

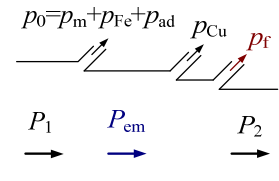
他励直流电机的功率平衡关系中不计 p_f 。

51

(3) 功率平衡方程式

并励直流发电机功率流程图

(他励: 不计 p_f)



电磁功率 $P_{em} = T \Omega = E_a I_a$

P_{em} 是为克服制动性的电磁转矩 T 而需要输入的机械功率 $T \Omega$, 同时是电枢回路通过电磁感应而产生的电功率 $E_a I_a$ 。 P_{em} 是反映机械能转换为电能的功率。

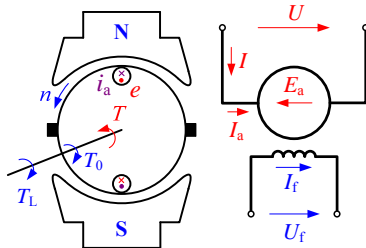
52

19.5 直流电机的基本方程式

2. 直流电动机的基本方程式

电动机惯例

- 向电枢看, U 与 I 同向。
- E_a 与 I_a 反向, 也称反电势。
- 电磁转矩 T 与 n 同向, 是拖动性转矩。



53

2. 直流电动机的基本方程式

电流关系

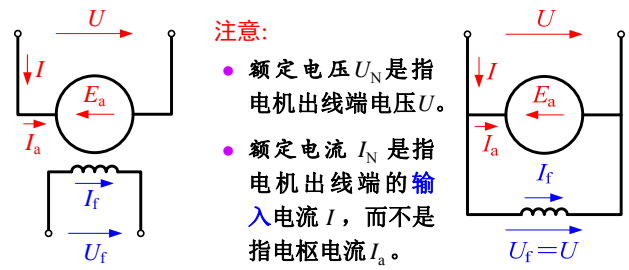
与励磁方式有关。

注意:

- 额定电压 U_N 是指电机出线端电压 U 。
- 额定电流 I_N 是指电机出线端的输入电流 I , 而不是指电枢电流 I_a 。

他励: $I = I_a$

并励: $I = I_a + I_f$



54

2. 直流电动机的基本方程式

(1) 电动势平衡方程式

- 他/并励直流电动机电枢回路的电动势平衡方程式 (按电动机惯例)

$$U = E_a + I_a R_a$$
- 串励直流电动机

$$I = I_a = I_f, \text{ 电动势平衡方程式为 } U = E_a + I_a R'_a$$
 其中, R'_a 为电枢回路总电阻 (包括电枢绕组、励磁绕组等的电阻)。

结论: 直流电动机, $E_a < U$ 。

2. 直流电动机的基本方程式

(2) 转矩平衡方程式

以各转矩的实际方向作为其参考方向, 有

$$T = T_L + T_0 = T_2 + T_0$$

- 电动机的电磁转矩 T 等于输出转矩 T_2 (负载转矩 T_L) 与空载转矩 T_0 之和 (T_L 和 T_0 都是制动性转矩)。
- $T > T_L$, 电动机的转向取决于 T 的方向。
- 空载转矩 T_0 对应空载损耗 p_0 (包括: 机械损耗 p_m 、铁耗 p_{Fe} 、附加损耗 p_{ad})。

2. 直流电动机的基本方程式

(3) 功率平衡方程式

在 $U = E_a + I_a R_a$ 两边同乘电枢电流 I_a , 得

$$UI_a = E_a I_a + I_a^2 R_a$$

对并励电动机, $I_a = I - I_f$, 则

$$P_1 = P_{em} + p_{Cu} + p_f$$

P_{em} —— 电动机的电磁功率, $P_{em} = E_a I_a$;
 P_1 —— 电动机的输入功率 (电功率), $P_1 = UI$;
 p_{Cu} —— 电枢回路的铜耗, $p_{Cu} = I_a^2 R_a$;
 p_f —— 励磁回路铜耗, $p_f = UI_f = I_f^2 R_f$ 。

(3) 功率平衡方程式

在 $T = T_2 + T_0$ 两边同乘机械角速度 Ω , 得

$$T\Omega = T_2\Omega + T_0\Omega$$

即

$$P_{em} = P_2 + p_0$$

其中,

电磁功率 $P_{em} = T\Omega$
 输出功率 $P_2 = T_2\Omega = T_L\Omega$
 空载损耗 $p_0 = T_0\Omega = p_m + p_{Fe} + p_{ad}$

(3) 功率平衡方程式

并励直流电动机功率流程图

(他励: 不计 p_f)

电磁功率 $P_{em} = E_a I_a = T\Omega$

P_{em} 是电枢回路从电源吸收的电功率 $E_a I_a$ (因 E_a 与 I_a 反向); 同时, P_{em} 是电动机通过电磁感应, 在电磁转矩 T 的作用下转换得到的全部机械功率 $T\Omega$ 。 P_{em} 是反映电能转换为机械能的功率。

第19章 直流电机的运行原理

小结

- ✓ 直流电机电枢绕组 (单叠绕组) 的基本特点。
- ✓ 直流电机的励磁方式。
- ✓ 直流电机电枢反应及其性质。
- ✓ 直流电机电枢绕组的感应电动势 (电枢电动势)。
- ✓ 直流电机的电磁转矩、电磁功率表达式。
- ✓ 直流发电机/电动机的电动势方程式, 功率平衡关系 (注意励磁方式的影响)。
- ✓ 直流发电机/电动机的转矩平衡关系。



小结 (续)

✓ 主要概念

单叠绕组, 并联支路, 并联支路对数
主极中心线, 几何中性线, 电刷位于几何中性线
他励, 并励, 串励, 复励
电枢电动势, 电枢电流, 电枢反应
每极磁通量, 电动势常数, 转矩常数
电磁转矩, 电磁功率

61



第20章 直流电机的运行特性

▼ 学习目标

- 理解他励、并励直流发电机的电压调整特性
- 熟练掌握直流电动机机械特性的特点 (他励/并励)
- 掌握他励直流电动机调速的方法与分析
- 理解直流电动机的起动方法

62

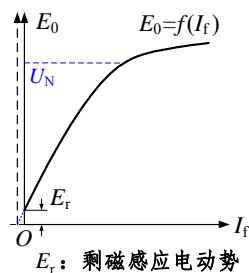


20.1 直流发电机的运行特性

定义: 在 $n=n_N$ 时, U 、 I (或 I_a)、 I_f 三者之一保持不变, 其他两个量之间的关系曲线。

1. 空载特性 $E_0=f(I_f)$

- 空载特性实质上是磁化特性, 与励磁方式无关。
- 不论实际励磁方式如何, 空载特性都在他励方式下测取。



63



2. 电压调整特性 (外特性)

定义 $n=n_N$, I_f 一定 (自励时指励磁回路电阻不变) 时, 电枢端电压 U 与负载电流 I 的关系 $U=f(I)$ 。

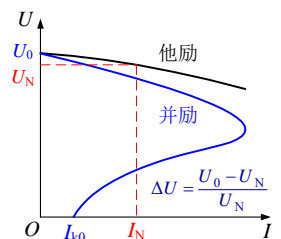
电压调整特性与励磁方式有关。

■ 电压调整率 ΔU

为什么负载时 $U < U_0$?

- 交轴电枢反应的去磁作用;
- $I_a R_a$;
- $U \downarrow \rightarrow I_f \downarrow$ (并励)。

ΔU (并励) $>$ ΔU (他励)



64

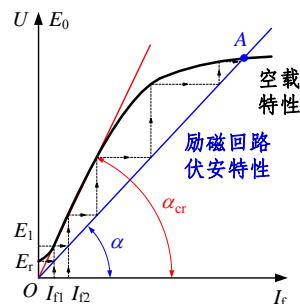


3. 并励直流发电机的建压

建压 —— 自行建立励磁和端电压的过程。

► 建压条件

- 电机主磁路有剩磁;
- 励磁绕组并联到电枢绕组两端的极性正确 (使 F_f 与剩磁磁场方向相同);
- 励磁回路总电阻小于电机运行转速下的建压临界电阻 R_{cr} ($R_{cr} \propto \tan \alpha_{cr}$)。



65



20.2 直流电动机的运行特性

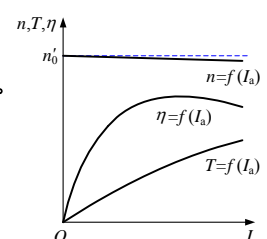
直流电动机的运行特性与励磁方式有关

1. 他/并励直流电动机的工作特性

定义: 电动机稳态运行时, 转速 n 、电磁转矩 T 和效率 η 与电枢电流 I_a (或输出功率 P_2) 的关系。

当 $U=U_N$, $I_f=I_{fN}$ 时:

- 转速调整特性 $n=f(I_a)$
- 转矩特性 $T=f(I_a)$
- 效率特性 $\eta=f(I_a)$



66



20.2 直流电动机的运行特性

2. 他/并励直流电动机的机械特性

定义: 在电枢端电压 $U = \text{const}$, 电枢回路和励磁回路电阻不变时, 转速 n 和电磁转矩 T 之间的关系 $n = f(T)$ 。

- **固有机械特性:** $U = U_N$, 电枢回路未串联附加电阻, $I_f = I_{fN}$ 时的机械特性。
- **人为机械特性:** $U \neq U_N$, 或 $I_f \neq I_{fN}$, 或电枢回路串联附加电阻时的机械特性。

67



2. 他/并励直流电动机的机械特性

(1) 机械特性的表达式

$$E_a = C_e \Phi n \quad U = E_a + I_a R_a$$

$$\Downarrow$$

$$\text{转速公式} \quad n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$$

$$\Downarrow \quad T = C_T \Phi I_a$$

$$\text{机械特性表达式} \quad n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T = n'_0 - \alpha T$$

68



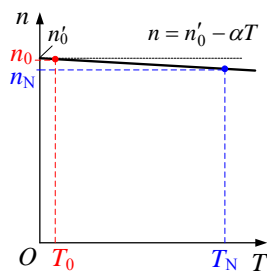
2. 他/并励直流电动机的机械特性

(2) 固有机机械特性

$U = U_N, I_f = I_{fN}$ 时, $\Phi = \Phi_N$

$$\alpha = \frac{R_a}{C_e C_T \Phi_N^2}, \quad n'_0 = \frac{U_N}{C_e \Phi_N}$$

- 忽略电枢反应时, 机械特性是一条直线。
 α —— 机械特性的斜率
 n'_0 —— 理想空载转速
- 通常 $R_a \ll C_e C_T \Phi_N^2$, 故 α 很小, 固有机械特性很接近水平线, 是**硬特性**。



69



20.2 直流电动机的运行特性

3. 串励直流电动机的机械特性

设磁路不饱和, 则 $\Phi \propto I_f = I_a$, $T = C_T \Phi I_a \propto \Phi^2$

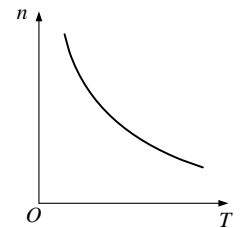
令 $\Phi = k_\Phi \sqrt{T}$,

$$\text{代入} \quad n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R'_a}{C_e \Phi}$$

得机械特性表达式为

$$n = \frac{U}{C_e k_\Phi \sqrt{T}} - \frac{R'_a}{C_e C_T k_\Phi^2}$$

结论: n 随 T 增加而迅速下降, 是**软特性**。



串励直流电动机不允许空载运行。

70



第20章 直流电机的运行特性

20.3 直流电动机的调速

对于给定的机械负载, 其机械特性是一定的。

电动机的机械特性可人为改变, 其人为机械特性与负载机械特性的交点, 即是调速后的工作点。

1. 直流电动机的调速方法

由 $n = \frac{E_a}{C_e \Phi} = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$, 可知有三种调速方法:

- 电枢串接电阻调速
- 改变端电压调速
- 改变磁通调速 (即改变励磁电流调速)

71



20.3 直流电动机的调速

2. 他励直流电动机的调速

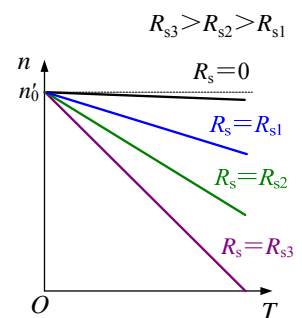
(1) 电枢串接电阻调速

➤ 人为机械特性

在 U 和 Φ 不变的条件下, 在电枢回路串入附加电阻 R_s , 则

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

- 理想空载转速 n'_0 不变;
- 斜率 α 随 R_s 增加而增大。



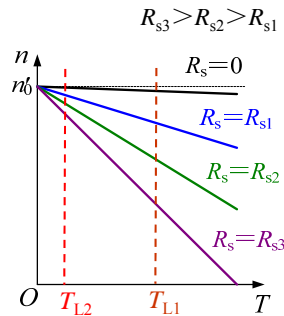
72



(1) 电枢串接电阻调速

调速性能

- 只能从基速（固有机特性上的转速）向下调；
- 机械特性变软；
- 调速范围与负载转矩大小有关；
- 调速时效率低：
 $T_2 = \text{const}$ 时, T 不变 \Rightarrow
 I_a 不变 $\Rightarrow P_1 = UI_a$ 不变,
 但 $P_2 = T_2 \Omega \downarrow$, 故 $\eta \downarrow$ 。



73



2. 他励直流电动机的调速

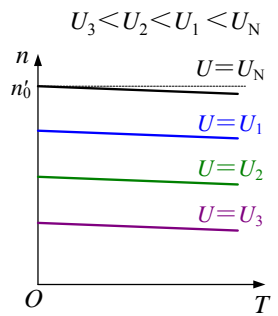
(2) 改变端电压调速

人为机械特性

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

在 R_a 和 Φ 不变的条件下, 降低电枢端电压 U , 则

- 理想空载转速 $n'_0 \propto U$;
- 斜率 α 不变。
- 人为机械特性是与固有机械特性平行的直线。



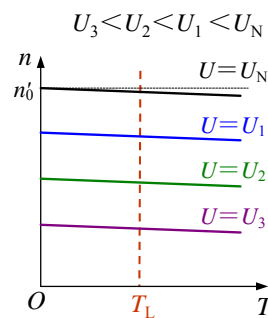
74



(2) 改变端电压调速

调速性能

- 只能从基速（固有机特性上的转速）向下调；
- 机械特性斜率不变；
- 调速范围较大；可平滑调速（因 U 可连续变化）；
- 调速时效率较高：
 $T_2 = \text{const}$ 时, $P_2 = T_2 \Omega \propto n$;
 T 不变 $\Rightarrow I_a$ 不变
 $\Rightarrow P_1 \propto U \approx E_a \propto n$;
 故 η 基本不变。



75



2. 他励直流电动机的调速

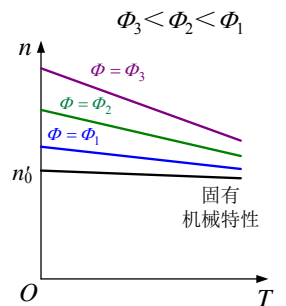
(3) 改变磁通调速

人为机械特性

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

在电枢端电压 U 和电枢回路总电阻 R_a 不变的条件下, 减小主磁通 Φ (励磁电流 I_f),

- 理想空载转速 $n'_0 \uparrow$;
- 斜率 $\alpha \uparrow$ 。



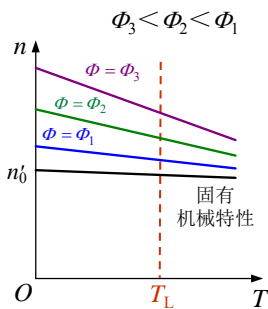
76



(3) 改变磁通调速

调速性能

- 是从基速向上调速的方法（弱磁升速）；
- 最高转速受换向和机械强度的限制；
- 控制回路功率小；
- 调速时效率较高：
 $T_2 = \text{const}$ 时, T 不变,
 $\Phi \downarrow \rightarrow n \uparrow \rightarrow P_2 = T_2 \Omega \uparrow$
 $\Phi \downarrow \rightarrow I_a \uparrow \rightarrow P_1 = UI_a \uparrow$



恒转矩负载时可能过流!

77



(3) 改变磁通调速

调速性能 (续)

- 恒功率调速时 ($P_2 = \text{const}$), $I_a = \text{const}$.
 因 $P_2 = \text{const}$, 则 P_{em} 不变 (不计 T_0 与 p_0);
 即 $P_{em} = E_a I_a = (U - I_a R_a) I_a = \text{const}$;
 而 U, R_a 不变, 故 I_a 不变。
- I_a 增大会使电动机发热增加, 换向条件恶化, 因此该方法适合于恒功率调速。
- 在采用他励直流电动机的电力传动系统中, 广泛采用降低电枢端电压和减弱主磁通相结合的调速方法, 可获得优良的调速性能。

78



20.4 直流电动机的起动

1. 全压起动 (直接起动)

- 起动电流很大 ($I_a = U/R_a$, 可达10~20倍额定值); 起动转矩大。
- 只允许在功率很小的直流电动机中采用。

2. 电枢串接电阻起动

起动时在电枢回路串入可变电阻, 以限制起动电流。

3. 降压起动

- 起动时, 逐步提高电枢端电压至额定值。
- 对并励直流电动机, 起动过程中应使 U_f 不降低。

79



小 结

- ✓ 直流电机的空载特性。
- ✓ 他/并励直流发电机的电压调整特性 (外特性)。
- ✓ 他/并励直流电动机的机械特性, 串励直流电动机机械特性的特点。
- ✓ 他励直流电动机的三种调速方法, 起动方法。
- ✓ 主要概念
机械特性 (理想空载转速, 斜率); 弱磁升速

80



总 结

1. 直流电机的基本工作原理、额定值

(1) 换向器的作用

绕组线圈中 交流 e, i $\xleftrightarrow{\text{换向器}}$ 正、负电刷端 直流 E_a, I_a

导体在不同极性的磁极下时, 使导体电流改变方向 \Rightarrow 平均电磁转矩

(2) 励磁方式

主要掌握他励、并励。

81



总 结 (续)

(3) 额定值

- 额定值: $P_N, U_N, I_N, I_{aN}, n_N, T_N, I_{fN}$
- 额定负载的含义 (发电机指 $I = I_N$, 电动机指 $T_2 = T_{2N}$)

注意: 额定电流 I_N 与额定电枢电流 I_{aN} 的关系

- 他励、并励时不同;
- 并励时, 发电机与电动机时不同

发电机: $I_{aN} = I_N + I_{fN}$;

电动机: $I_{aN} = I_N - I_{fN}$ 。

82



总 结 (续)

2. 电枢绕组

- 直流电机的电枢绕组是自成闭合回路的。
- 电刷使电枢绕组形成了若干条并联支路, 电枢绕组电流通过电刷引入/引出。
- 单叠绕组的并联支路对数 $a = p$ 。

3. 电枢反应

主要了解:

- 磁路饱和时交轴电枢反应的性质;
- 磁路线性与饱和时交轴电枢反应性质的差别。

83



总 结 (续)

4. 电枢绕组的感应电动势和电磁转矩

(1) 表达式

$$E_a = C_e \Phi n, \quad T = C_T \Phi I_a$$

$$\text{其中: } C_e = \frac{pz}{60a}, \quad C_T = \frac{pz}{2\pi a}, \quad C_T = \frac{60}{2\pi} C_e。$$

注意: Φ 为每极磁通量, 即计及电枢反应后的每极主磁通。

(2) 通过 E_a 判断直流电机的运行状态

$E_a > U$ —— 发电机; $E_a < U$ —— 电动机。

84



第5篇 直流电机

总结 (续)

5. 基本关系式

		发电机	电动机
惯例			
电流 关系	他励	$I = I_a$	
	并励	$I = I_a - I_f$	$I = I_a + I_f$
电动势方程式		$E_a = U + I_a R_a$	$U = E_a + I_a R_a$
转矩平衡方程式		$T_1 = T + T_0$	$T = T_L + T_0 = T_2 + T_0$
功率平衡方程式		$P_1 = P_{em} + p_0$ $P_{em} = P_2 + p_{Cu} (+ p_f)$	$P_1 = P_{em} + p_{Cu} (+ p_f)$ $P_{em} = P_2 + p_0$
		$p_0 = p_m + p_{Fe} + p_{ad}$	
功率、转矩关系		$P_{em} = T\Omega = E_a I_a, \quad p_0 = T_0\Omega, \quad p_{Cu} = I_a^2 R_a, \quad p_f = U_f I_f = I_f^2 R_f$	
		$P_1 = T_1\Omega, \quad P_2 = UI$	$P_1 = UI, \quad P_2 = T_2\Omega$

85



第5篇 直流电机

总结 (续)

6. 直流发电机的电压调整特性

- 他励/并励发电机 U 随 I_a 增大而降低的原因。
- 并励与他励发电机的异同之处。

7. 直流电动机的特性

(1) 机械特性 (他励/并励)

由 $U = E_a + I_a R_a$, $E_a = C_e \Phi n$ 和 $T = C_T \Phi I_a$ 推导出。

(其中: 转速公式 $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$)

(2) 调速方法 (他励)

- 由转速公式可以看出三种调速方法。
- 调速分析计算实质上是对上面基本公式的综合运用。

86