

机械特性方程式:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T = n_0 - \beta T$$

$n_0$ : 理想空载转速

$\beta$ : 机械特性的斜率。越小表明随着转矩 $T$ 的增大转速下降越平缓, 机械特性越硬

**例 5-2** 试分析在下列情况下, 直流电动机的电枢电流和转速有何变化(假设电动机不饱和)。

(1) 电枢端电压减半, 励磁电流和负载转矩不变。

(2) 电枢端电压减半, 励磁电流和输出功率不变。

(3) 励磁电流加倍, 电枢端电压和负载转矩不变。

(4) 励磁电流和电枢端电压减半, 输出功率不变。

(5) 电枢端电压减半, 励磁电流不变, 负载转矩随转速的平方而变化。

**解:** (1) 因为磁路不饱和且励磁电流  $I_f$  不变, 因此主磁通  $\Phi$  不变。负载转矩不变, 即电磁转矩  $T_N$  不变, 由于  $T_N = C_T \Phi I_a$ , 故电枢电流  $I_a$  不变。根据  $n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}$ ,  $U$  减半, 故转速  $n$  下降, 且  $n$  小于原来的一半。

(2)  $U$  减半, 输出功率  $P_2$  不变,  $I_a$  必然上升, 否则, 由于输入功率  $P_1 = UI_a$  (假设为他励), 若  $I_a$  不变或减小, 则  $P_1$  减小,  $P_2$  必然不能保持不变。 $I_a$  上升,  $n$  必然下降。

(3)  $I_f$  加倍, 则  $\Phi$  加倍。 $T_2$  不变, 即  $T_N$  不变, 故  $I_a$  减半。由于  $I_a R_a \ll U$ , 从  $n$  的表达式可知, 此时  $n$  下降。

(4)  $U$  减半而  $P_2$  不变, 由(2)分析知  $I_a$  上升。 $I_f$  减半, 则  $\Phi$  减半,  $(U - I_a R_a)$  较  $C_e \Phi$  减小得多, 故  $n$  下降。

(5)  $I_f$  不变, 则  $\Phi$  不变。由于  $T_2 \propto n^2$ ,  $T_N$  近似与  $n^2$  成正比, 亦即  $I_a$  近似与  $n^2$  成正比。当  $U$  减半时, 假设  $n$  上升, 则  $I_a$  上升,  $(U - I_a R_a)$  下降, 由  $n = (U - I_a R_a) / C_e \Phi$  得  $n$  下降, 这与假设相矛盾。故  $n$  必然下降,  $I_a$  下降。

## 5.4 他励直流电动机的启动

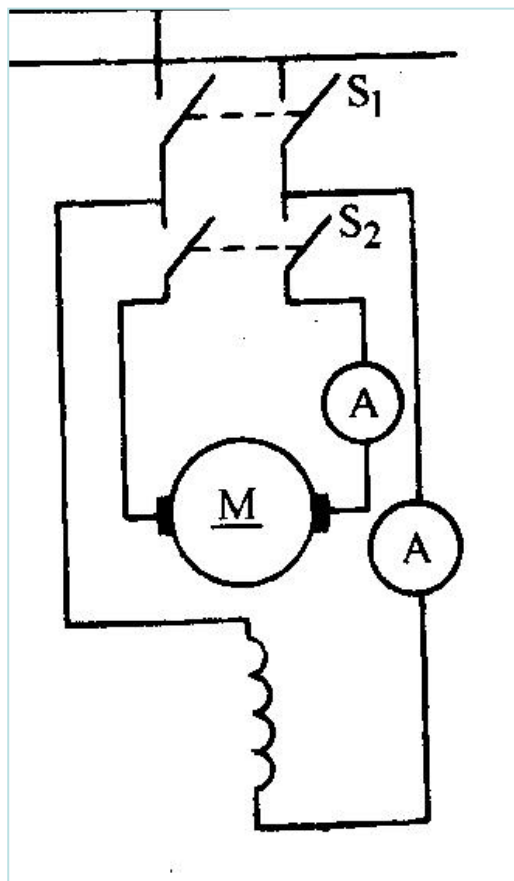
起动初始瞬间，电机转速为零，故电机感应电动势为零，电压全部加在电枢电阻上，造成启动电流很大，坏处：

- 1) 火花大，破坏换向；
- 2) 电枢绝缘破坏，烧断绕组；
- 3) 供电电源电压波动；
- 4) 启动转矩过大，引起冲击。

所以，对直流电动机的启动要求：在保证启动转矩足够大的前提下，尽量减小启动电流。

启动方法：全压启动、电枢回路串电阻启动和降压启动。

## 1. 全压启动



启动电流很大，可达额定电流的十几倍。

只有小容量电机才采用全压启动，因为 $R_a$ 较大，启动电流不会很大；转动惯量小，转速上升快。

## 2. 电枢回路串电阻启动

### (1) 无级启动

启动时先把启动电阻调到最大值，再接通电源，电动机开始启动，随着转速的升高，逐渐减少启动变阻器的值，直到全部切除启动电阻。

一般情况下，为了充分利用电动机的过载能力，使电动机获得适当的启动转矩，最大启动电流取为额定电流的1.8 ~ 2.5倍，根据

$$I_{stm} = \frac{U_N}{R_a + R_\Omega}$$

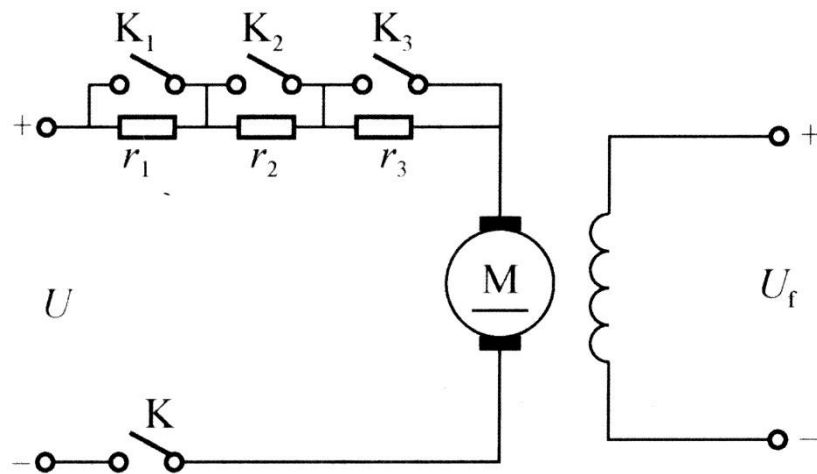
可得初始启动电阻值：

$$R_\Omega = \frac{U_N}{I_{stm}} - R_a$$

## (2) 有级启动

### ① 启动过程

以他励直流电动机采用三级启动为例：

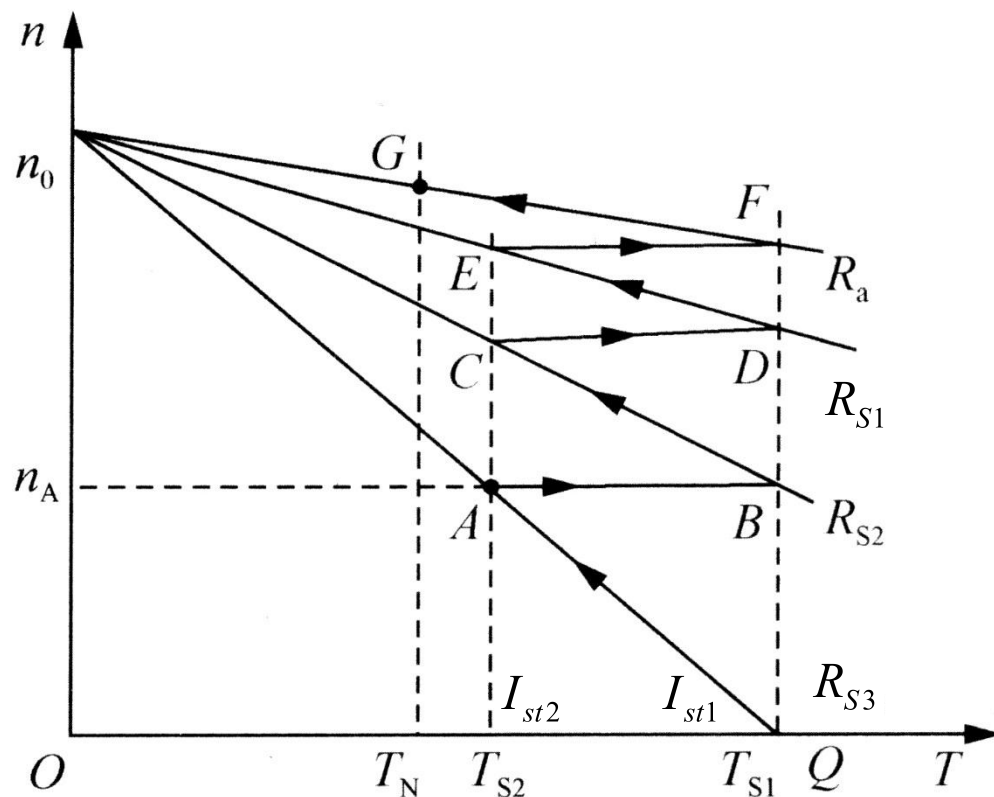


开始时开关 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 均断开，此时三部分电阻均接入电路，启动电阻为：

$$R_{S3} = R_a + r_1 + r_2 + r_3$$

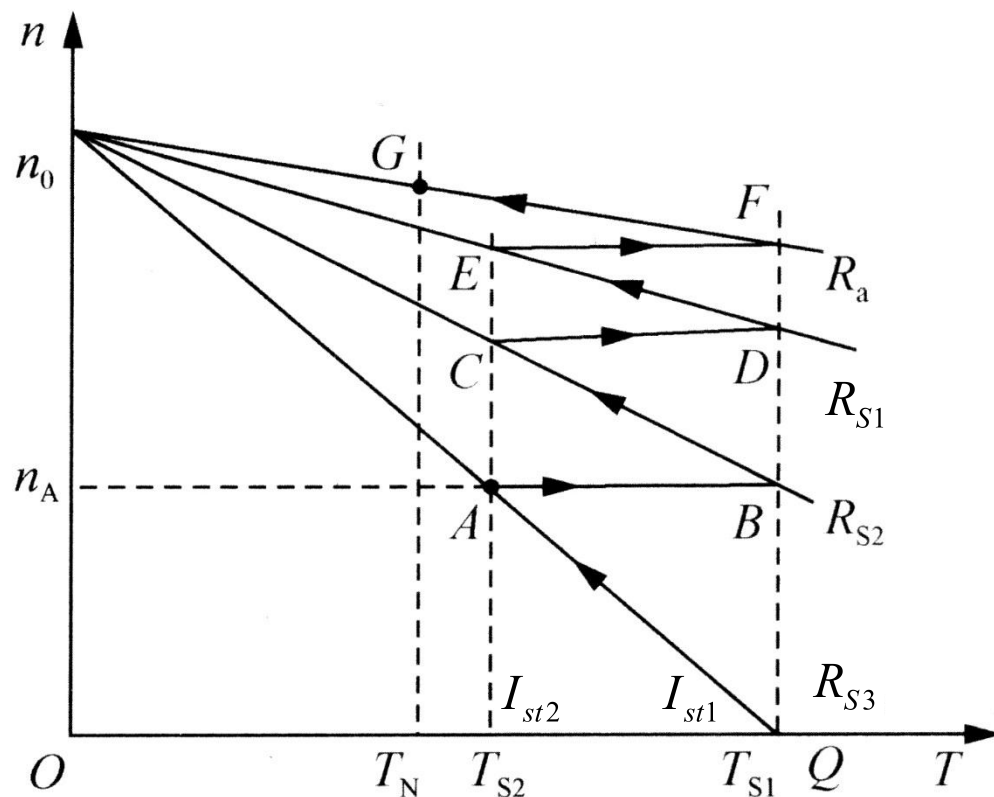
启动电流为：

$$I_{st1} = \frac{U_N}{R_a + r_1 + r_2 + r_3}$$



电机启动，转速上升，工作点沿直线QA移动，电流逐步减小，到达切换电流 $I_{st2}$ （A点）时， $K_3$ 闭合，此时电阻为：

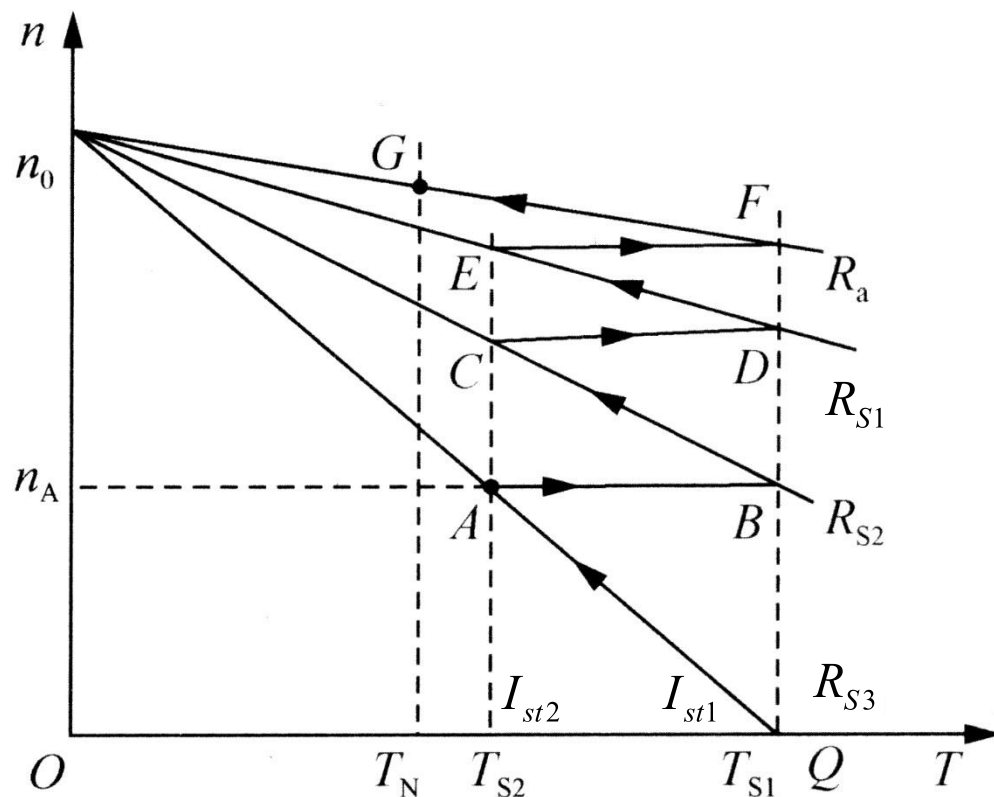
$$R_{S2} = R_a + r_1 + r_2$$



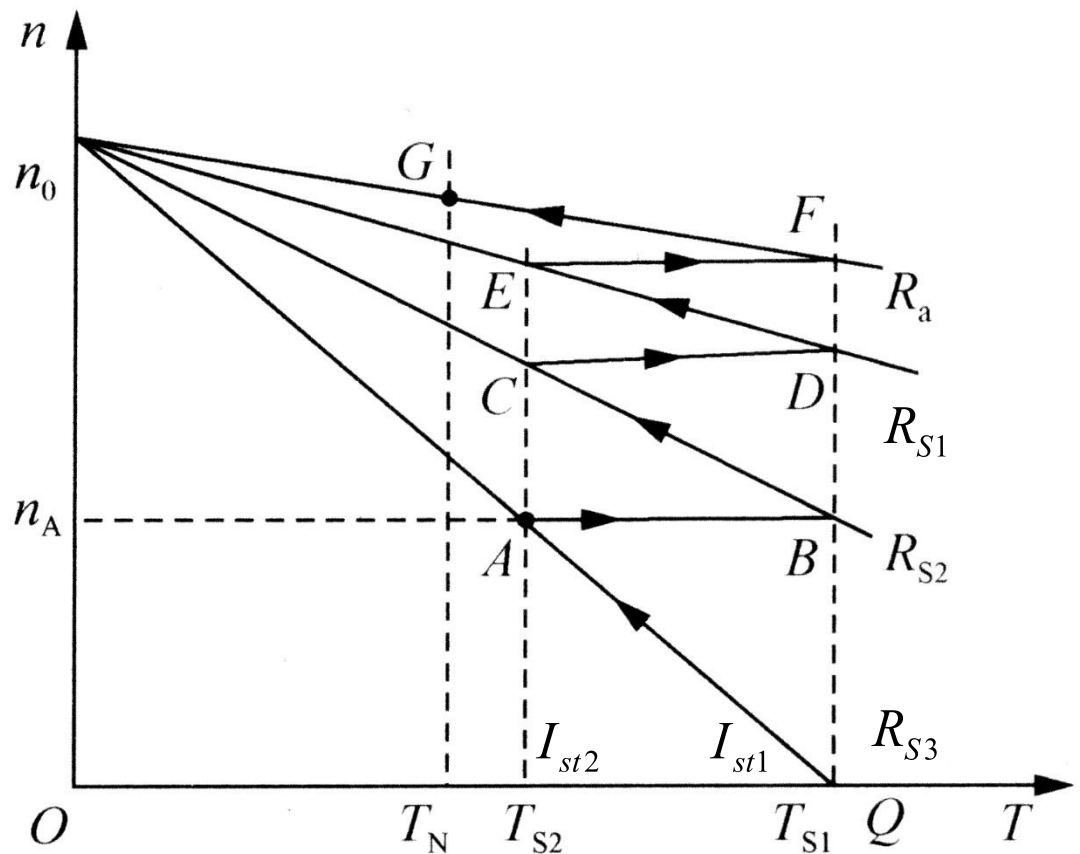
$K_3$ 闭合后，工作点从A点移至B点，再沿直线BC移动，电流逐步减小，到达切换电流 $I_{st2}$ （C点）时， $K_2$ 闭合，此时电阻为：

$$R_{S1} = R_a + r_1$$





$K_2$ 闭合后，工作点从C点移至D点，再沿直线DE移动，电流逐步减小，到达切换电流 $I_{st2}$ （E点）时， $K_1$ 闭合，此时仅电枢电阻工作，电机按固有机械特性曲线到达工作点。



## ② 启动过程总结

a) 回路电阻逐步减小

b) 工作点移动: **Q→A→B→C→D→E→F→G**

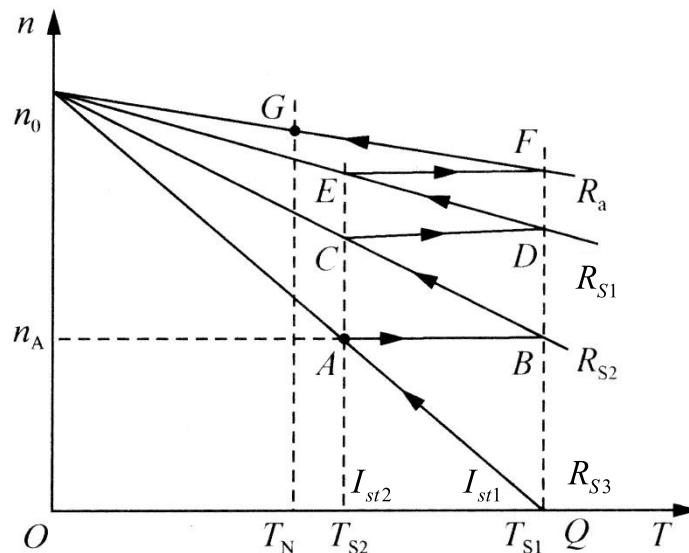
c) 良好的启动必须保证:每级启动电阻上有相同的最大启动电流和相同的切换电流.

### ③ 分级电阻计算

#### a) 启动电流选取

$$I_{st1} = (1.5 \sim 2.0) I_N$$

$$I_{st2} = (1.1 \sim 1.2) I_N$$



#### b) 从A到B的分析 (分为 $m$ 级)

切换瞬间，电机转速不变，所以感应电动势不变，则有：

$$U_N - I_{st2} R_{Sm} = U_N - I_{st1} R_{S(m-1)}$$

整理得：

$$\frac{R_{Sm}}{R_{S(m-1)}} = \frac{I_{st1}}{I_{st2}} = \beta$$

同理可得:

$$\frac{R_{Sm}}{R_{S(m-1)}} = \frac{R_{S(m-1)}}{R_{S(m-2)}} = \dots = \frac{R_{S2}}{R_{S1}} = \frac{R_{S1}}{R_a} = \frac{I_{st1}}{I_{st2}} = \beta$$

### c) 计算公式

令 $m$ 级启动时第 $m$ 级启动电阻为:

$$R_{Sm} = R_a + r_1 + r_2 + \dots + r_{m-1} + r_m$$

可得:

$$\begin{cases} r_1 = (\beta - 1)R_a \\ r_2 = (\beta^2 - \beta)R_a \\ \dots \\ r_m = (\beta^m - \beta^{m-1})R_a \end{cases}$$

### 3. 降压启动

启动时，降低电源电压，使得启动电流减小，随着 $n$ 上升， $E_a$ 上升，将电源电压逐步升到额定值，使电动机达到稳定运行。

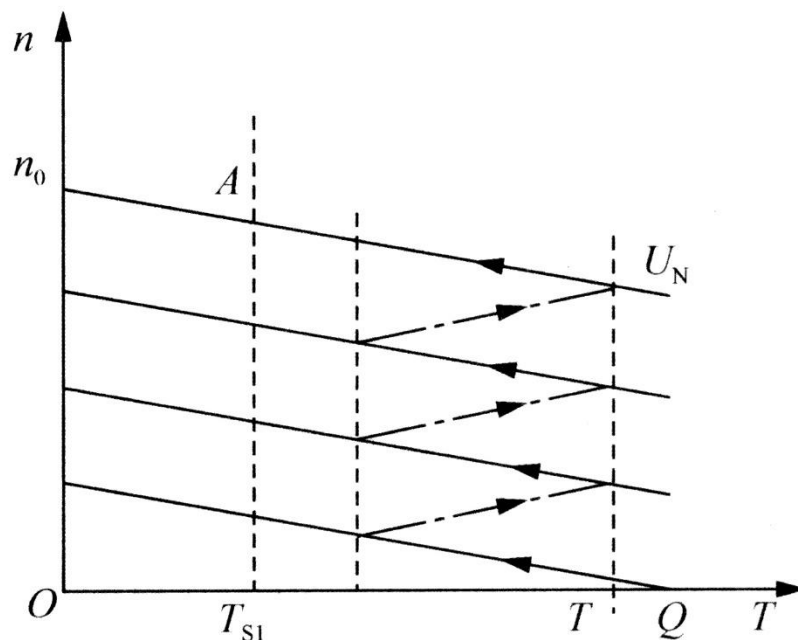


图 5.21 降压启动人为机械特性曲线

优点：不用串接电阻，效率高，启动平滑。

缺点：必须有专用电源设备，如：可控硅整流电源。

## 4. 直流电动机转向改变方法

- (1) 改变励磁电流的方向;
- (2) 改变电枢电流的方向。

**例 5-3** 一台他励直流电动机  $P_N=200\text{kW}$ ,  $U_N=440\text{V}$ ,  $I_N=497\text{A}$ ,  $R_a=0.076\Omega$ ,  $n_N=1500\text{r/min}$ , 计算五级启动时的启动电阻。

**解:** 采用解析法来计算启动电阻

选取启动电流  $I_1=(1.5\sim 2.0)I_N=(1.5\sim 2.0)\times 497=(745.5\sim 994)\text{A}$

取  $I_1=840\text{A}$ 。

则启动时电枢回路总电阻为

$$R=\frac{U_N}{I_{\text{stm}}}=\frac{440}{840}=0.524(\Omega)$$

计算启动电流比  $\beta$  的公式为

$$\beta=\sqrt[m]{\frac{R}{R_a}} \quad (5-28)$$

式中:  $m$  为启动级数, 本题采用五级启动, 所以  $m=5$ , 可以求得

$$\beta=\sqrt[5]{\frac{R}{R_a}}=\sqrt[5]{\frac{0.524}{0.076}}=1.47$$

检验切换电流  $I_2$ , 根据

$$I_2=\frac{I_1}{\beta}=\frac{840}{1.47}=571(\text{A})$$

在其规定的范围  $I_2=(1.1\sim 1.2)I_N=(1.1\sim 1.2)\times 497=(546.7\sim 596.4)\text{A}$  之内。

则各级启动总电阻如下:

$$r_{s1}=(\beta-1)R_a=(1.47-1)\times 0.076=0.036(\Omega)$$

$$r_{s2}=(\beta^2-\beta)R_a=(1.47^2-1.47)\times 0.076=0.0525(\Omega)$$

$$r_{s3}=(\beta^3-\beta^2)R_a=(1.47^3-1.47^2)\times 0.076=0.0772(\Omega)$$

$$r_{s4}=(\beta^4-\beta^3)R_a=(1.47^4-1.47^3)\times 0.076=0.1135(\Omega)$$

$$r_{s5}=(\beta^5-\beta^4)R_a=(1.47^5-1.47^4)\times 0.076=0.1668(\Omega)$$

## 5.5 他励直流电动机的调速

与交流异步电动机相比，直流电动机结构复杂，价格高，维护不方便，但它的最大优点是调速性能好。

直流电动机调速的主要优点是：

(1) 调速均匀平滑，可以无级调速。（注：异步电动机改变极对数调速的方法叫有级调速）。

(2) 调速范围大，调速比可达200以上（调速比等于最大转速和最小转速之比），因此机械变速所用的齿轮箱可大大简化。



下面以他励电动机为例说明直流电动机的调速方法。

转速公式:

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

调速方法有: 改变电枢回路电阻调速、改变磁通调速、改变电枢端电压调速。

# 1. 降低电枢电压调速

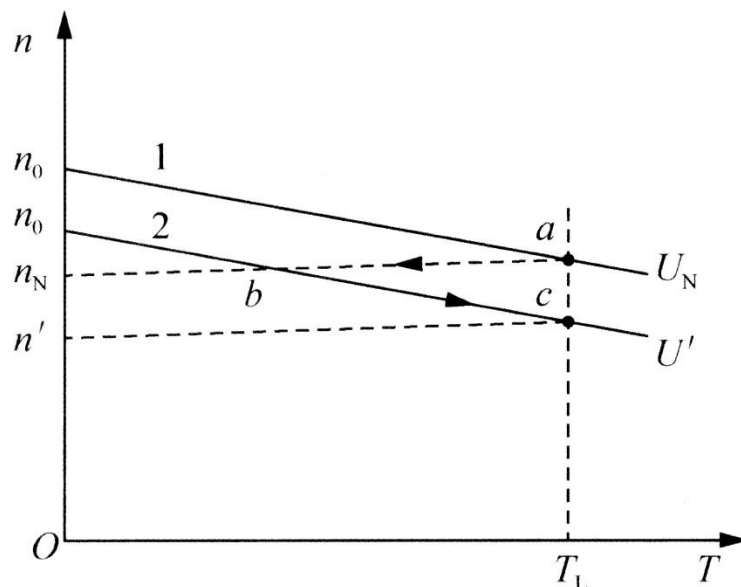


图 5.22 降低电枢电压调速

- (1) 工作时电枢电压一定，电压调节时，不允许超过  $U_N$ ，而  $n \propto U$ ，所以调速只能向下调。
- (2) 可得到平滑、无级调速。
- (3) 调速幅度较大。

## 2. 电枢串电阻调速

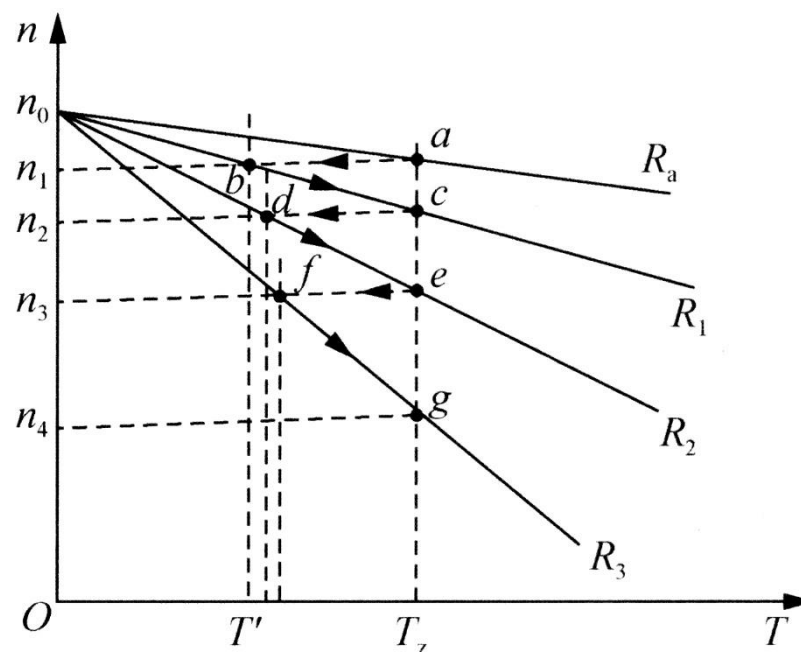


图 5.23 电枢串电阻调速

- (1) 调速只能向下调。
- (2) 电枢回路串接电阻，能量消耗大，效率低。
- (3) 方法简单，控制设备不复杂。

### 3. 弱磁调速

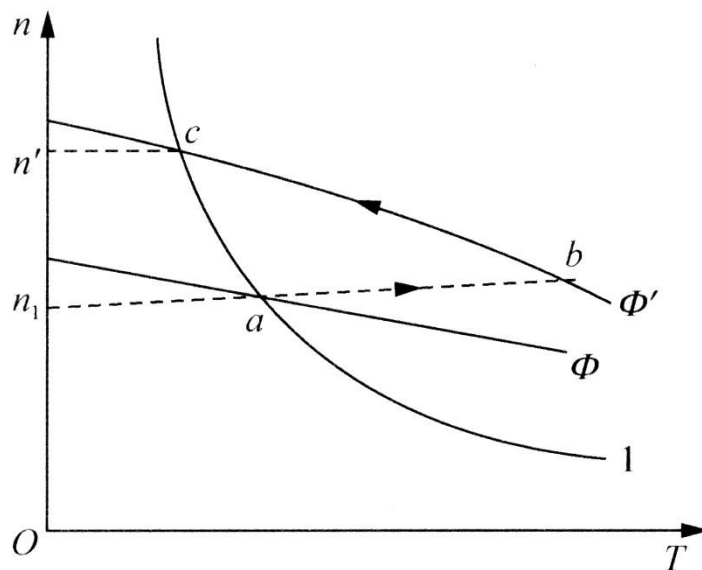


图 5.24 弱磁调速

- (1) 由于电动机额定工作状态下铁心已接近饱和，所以只能弱磁调速。
- (2) 由于励磁电流一般只有额定电流的1%~3%，所以弱磁调速能耗小、控制方便。
- (3) 转速只能由额定值上调，受电动机温升的控制，转速不能太高。
- (4) 一般多用于恒功率负载。

## 5.6 他励直流电动机的制动

为加快电动机停车过程，可以使用电气制动方法，即在电动机转轴上施加一个与旋转方向相反的电磁转矩（制动转矩），从而达到使电动机快速停车的目的，具体有三种方法：

能耗制动、反接制动、回馈制动。

# 1. 能耗制动

## (1) 制动原理

制动时将电枢绕组从电源上断开，并接上一电阻。

制动前电流：

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

制动时电流：

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

电枢电流方向改变了，电磁转矩方向亦改变，由驱动转矩变成阻转矩。

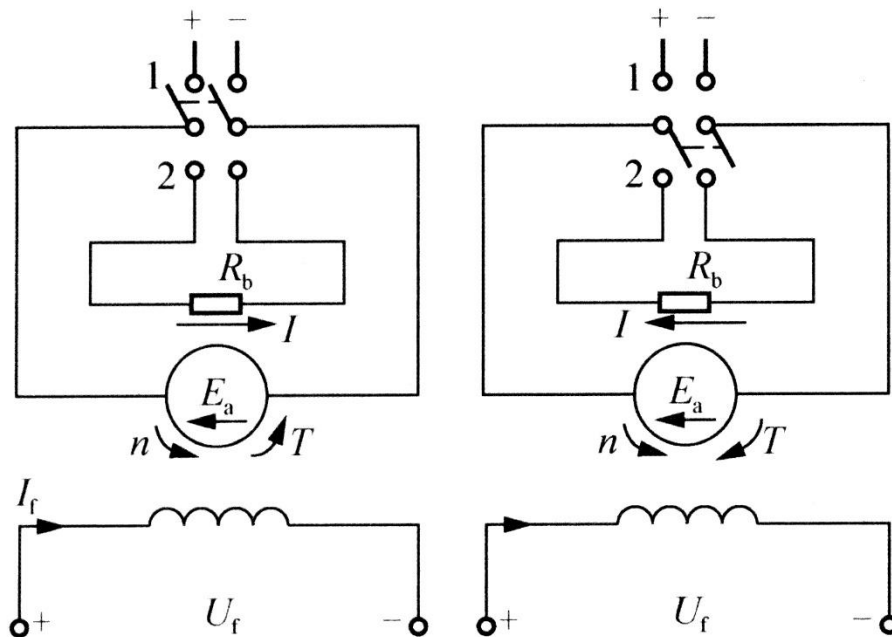


图 5. 25 能耗制动电路原理图

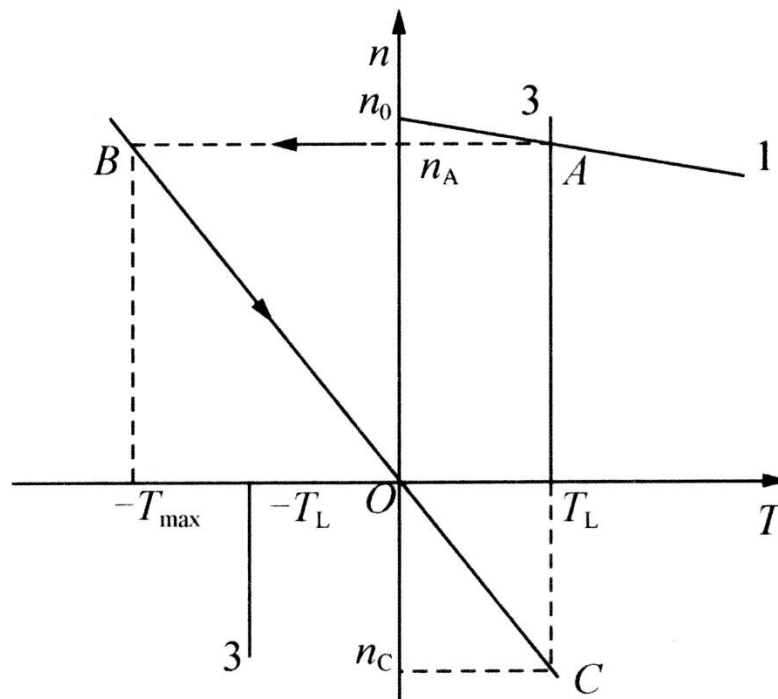


图 5.26 能耗制动机械特性

## (2)制动过程

① 反抗性恒转矩负载:  $A \rightarrow B \rightarrow O$

② 位能型恒转矩负载 (起重机) :  $A \rightarrow B \rightarrow C$

(3)特点: 制动转矩较小, 一般与机械制动配合使用。

## 2. 反接制动

### (1) 制动原理

带位能性恒转矩负载的电动机，**电枢反接的反接制动的工作原理。**

正常工作时，K1闭合，K2断开。制动时，K1断开，K2闭合。此时电枢电流为：

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

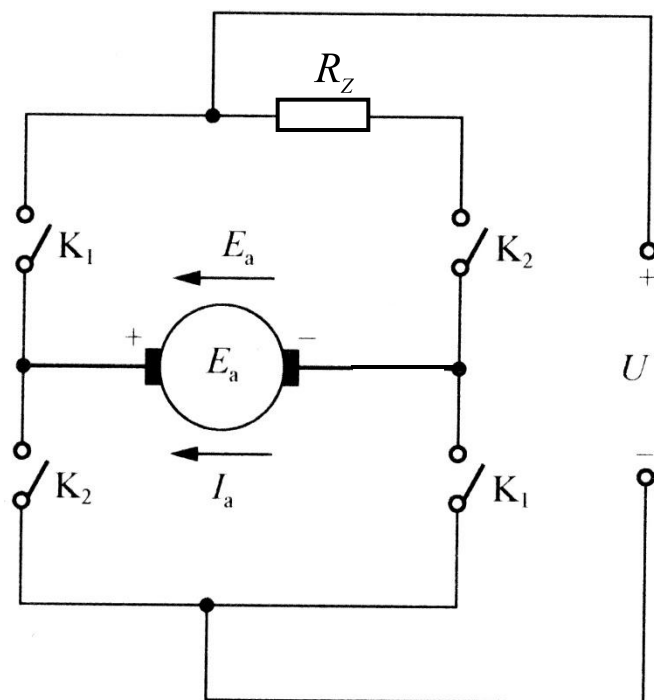


图 5. 27 电枢反接制动电路图



(2)制动过程: **a→b→c→d**

(3)特点:

- ① 制动转矩大、制动快, 但冲击电流大, 需串入电阻, 使损耗加大;
- ② 当转速接近零时, 若不及时切断电源, 电机将反转, 一般用于要求正反转的场合。

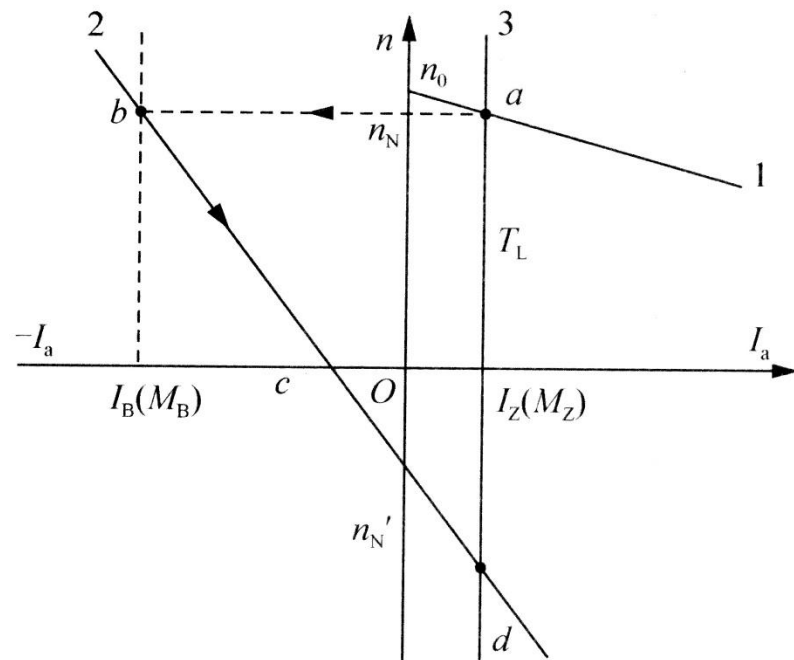


图 5.28 电枢反接制动机械特性

### 3. 回馈制动

#### (1) 制动原理

当电动机转轴受到外加转矩的作用，让电动机转速超过理想空载转速，使电动机处于发电状态，能量转换关系为系统动能转换为电能反馈给电网。

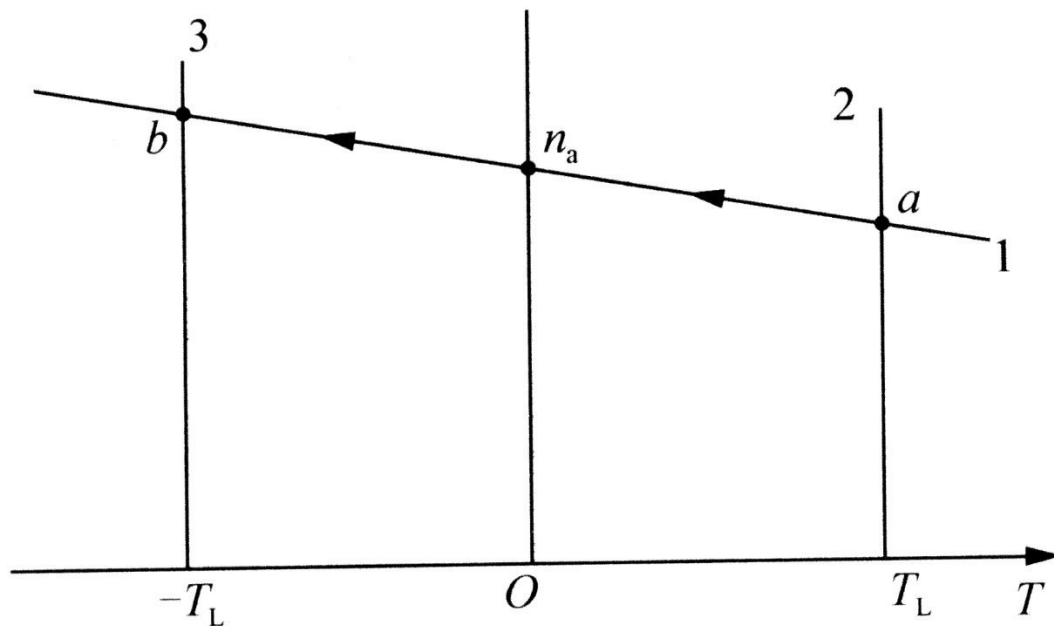


图 5.29 回馈制动机械特性

(2) 制动过程 (电车下坡) :  $a \rightarrow b$

(3) 特点:

- ① 电流反向;
- ② 能量流向变化: 电动状态下由电网电能转换为机械能驱动电机工作; 制动状态下电机轴上的机械能转换为电能送回电网。
- ③ 不能用来快速停车

**例5-6** 已知某电动机的机械性能如图5.30所示，当电动机与特性2、3、4的负载配合时，平衡点A、B、C、D中哪些是稳定运行点，哪些是非稳定运行点？

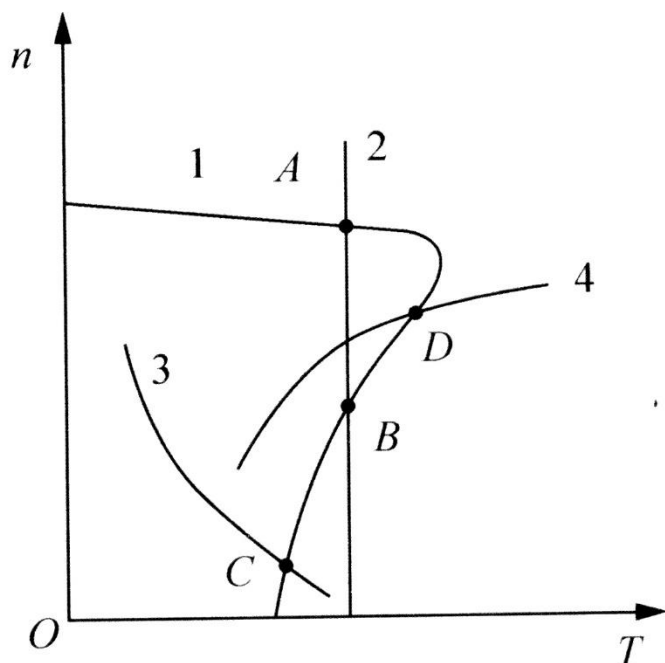


图 5. 30 电动机的机械特性

稳定运行点： **A、D**

非稳定运行点： **B、C**

例 5-7 他励直流电动机  $P=30\text{kW}$ ,  $U_N=220\text{V}$ ,  $I_N=158.8\text{A}$ ,  $n_N=1000\text{r/min}$ ,  $R_a=0.1\Omega$ , 试求: ①  $C_e\Phi_N$ 、 $T_N$ ,  $n_0$ ; ② 负载转矩  $T_L=0.8T_N$  时, 电动机在固有特性上(图 5.31)稳定运行的转速; ③ 负载转矩  $T_L=0.8T_N$  时, 电动机在电枢回路串入  $0.3\Omega$  电阻时的稳定运行转速; ④ 负载转矩  $T_L=0.8T_N$  时, 电动机在固有特性上稳定运行时进行能耗制动, 制动初始电流限制为额定电流的两倍时, 制动电阻应为多大? ⑤ 直接启动时启动电流为额定电流的几倍?

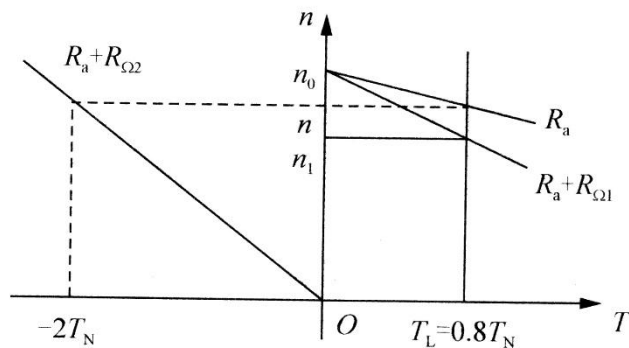


图 5.31 他励直流电动机机械特性

解:

$$\textcircled{1} C_e\Phi_N = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = \frac{220 - 158.8 \times 0.1}{1000} = 0.20412$$

$$T_N = 9550 \frac{P_N}{n_N} = 9550 \times \frac{30}{1000} = 286.5 (\text{N} \cdot \text{m})$$

$$n_0 = \frac{U_N}{C_e\Phi_N} = \frac{220}{0.20412} = 1077.8 (\text{r/min})$$

$$T_L = 0.8T_N \rightarrow I_a = 0.8I_{aN}$$

$$\textcircled{2} n = \frac{U_N - I_a R_a}{C_e\Phi_N} = \frac{220 - 0.8 \times 158.8 \times 0.1}{0.20412} = 1015.56 (\text{r/min})$$

$$\textcircled{3} n = \frac{U_N - I_a (R_a + R_{\Omega 1})}{C_e\Phi_N} = \frac{220 - 0.8 \times 158.8 \times (0.1 + 0.3)}{0.20412} = 828.85 (\text{r/min})$$

$$\textcircled{4} R_{\Omega 2} = \frac{U - C_e\Phi_N n_N}{I_a} - R_a = \frac{0 - 0.20412 \times 1015.56}{-2 \times 158.8} - 0.1 = 0.5527 (\Omega)$$

$$\textcircled{5} I_{st} = \frac{U_N}{R_a} = \frac{220}{0.1} = 2200 (\text{A})$$

$$K_{ist} = \frac{I_{st}}{I_N} = \frac{2200}{158.8} = 13.854$$

## 5.7 直流电动机的驱动控制电路

主要讨论功率不大、电压不高、体积较小的微型直流电动机的驱动。

包括：

- (1) 永磁式直流电动机
- (2) 电磁式并励直流电动机

# 1. 直流电机驱动问题

在直流电机驱动电路的设计中，主要考虑的是系统功能和性能。

## (1) 功能

### ① 电机是单向还是双向转动？

单向转动：一个大功率三极管或场效应管；

双向转动：由4个功率元件构成H桥电路来驱动。

### ② 需不需要调速？

不需要调速：继电器或开关即可

需要调速：广泛采用PWM脉宽调制技术

## (2) 性能

- ① 输出电流和电压范围
- ② 效率，功率管一般工作在饱和或截止状态
- ③ 对控制输入端的影响，可加光耦
- ④ 对电源的影响，注意共态导通问题
- ⑤ 可靠性



### (3) PWM (Pulse Width Modulation) 调速控制

- ① 按一个固定频率 (周期) 来接通和断开电源;
- ② 根据需要改变一个周期内接通和断开的的时间比 (占空比);
- ③ 采用PWM技术构成的无级调速系统, 启停时对直流系统无冲击, 并且具有启动功耗小、运行稳定的特点。

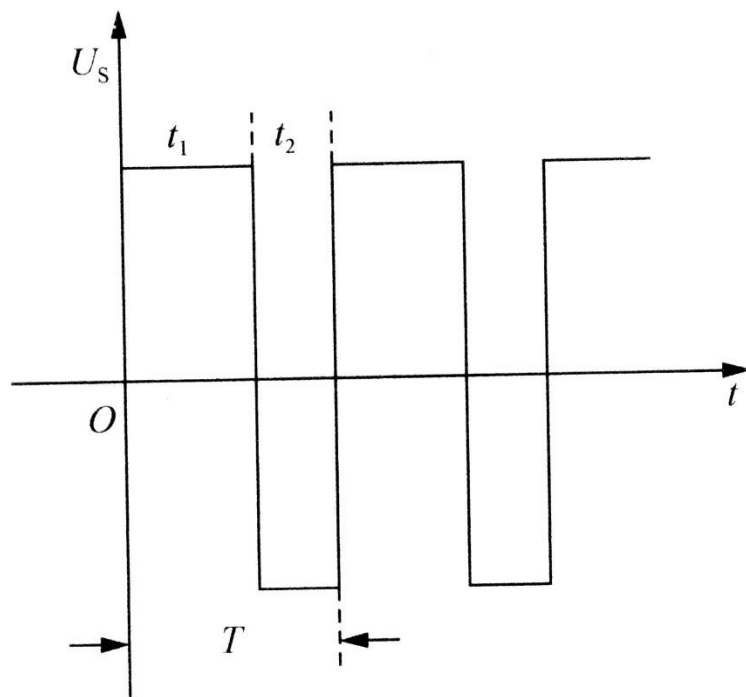
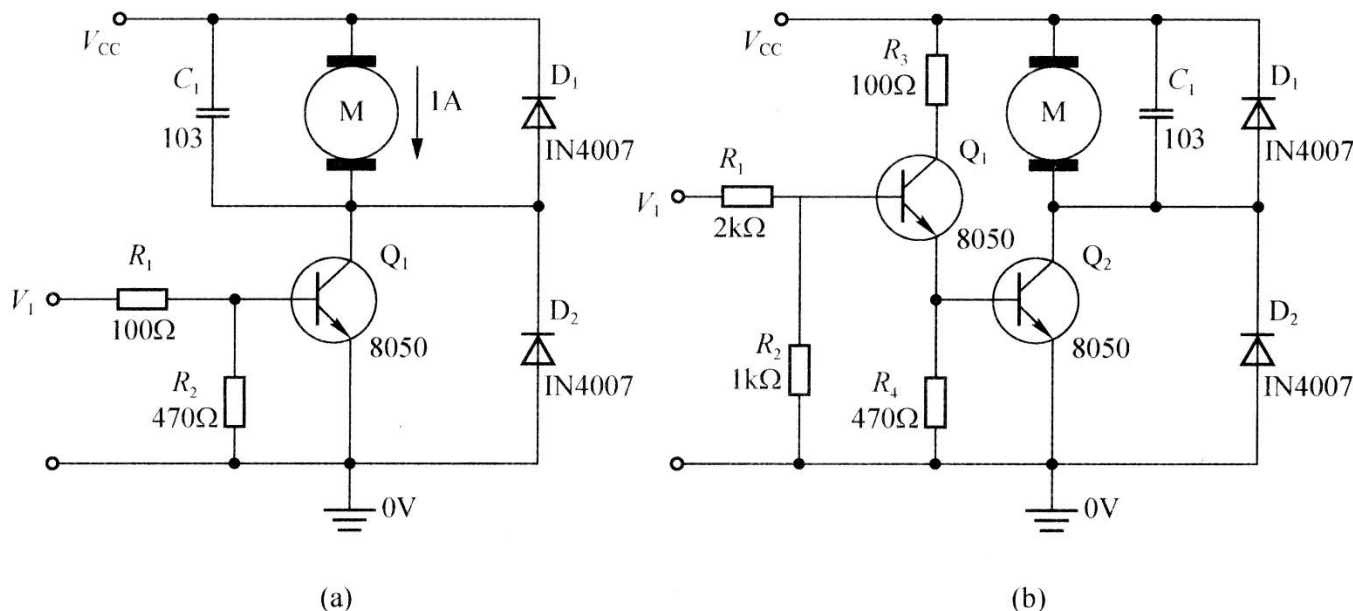


图 5.32 PWM 调速波形图

$$U_{av} = \frac{t_1}{t_1 + t_2} U_s = \frac{t_1}{T} U_s = a U_s$$

## 2. 直流电机单向起停驱动电路



(1)  $V_1$  高电平时电机启动运转

(2) 电路(b)增加一级放大，可以有效降低  $Q_1$  的基极电流，以  $R_3$  来限制  $Q_2$  的基极电流

(3)  $D_1$  为续流二极管， $D_2$  用来保护晶体管不被反向电动势损坏

### 3. 直流电机双向运转H桥驱动电路

#### (1) 直流电动机双向H桥驱动原理

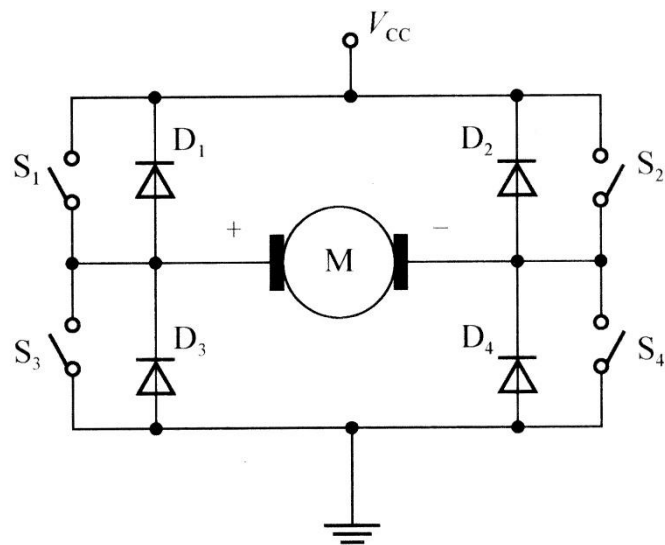


图 5.34 直流电动机 H 型全桥控制电路原理图

当S1、S4导通时，S2、S3关断，电机两端加正向电压，可以实现电机的正转或反转制动；当S2、S3导通时，S3、S4关断，电机两端为反向电压，电机反转或正转制动。

单电源，可实现四象限的驱动控制

## (2) 分立元件构成的H桥驱动电路

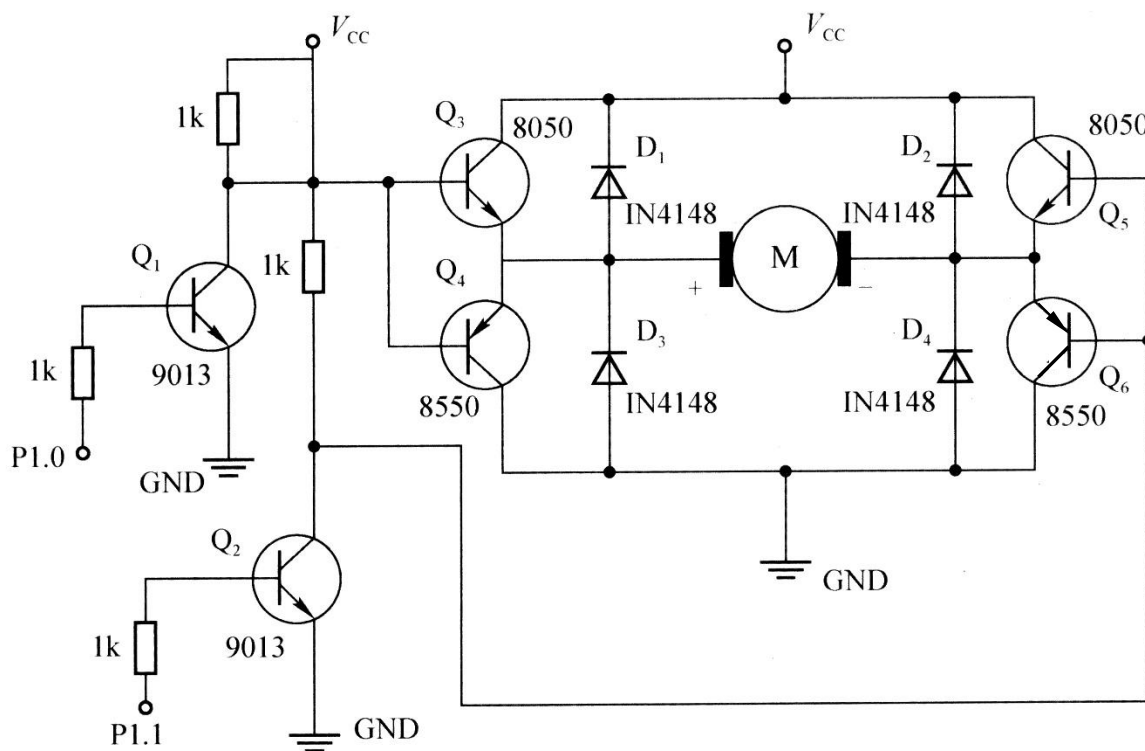


图 5. 35 分立元件 H 桥驱动电路

当P1.0=0,P1.1=1时，Q3和Q6导通，而Q4和Q5关断，电动机正转；当P1.0=1,P1.1=0时，Q3和Q6关断，而Q4和Q5导通，电动机反转。

### **(3) H桥驱动电路性能指标测试**

- ① 直流电动机两端电压与电源电压相比，不应该降低太多；
- ② 直流电动机通过的电流与电动机直接接电源相比，也不应该降低太多；
- ③ 功率管在长时间满负荷工作时，元件不应该烫手。

### **(4) 集成H桥驱动电路**

**L293D、L298N、TA7257P、SN754410等**

## 4. 直流电机单向运转PWM调速驱动电路

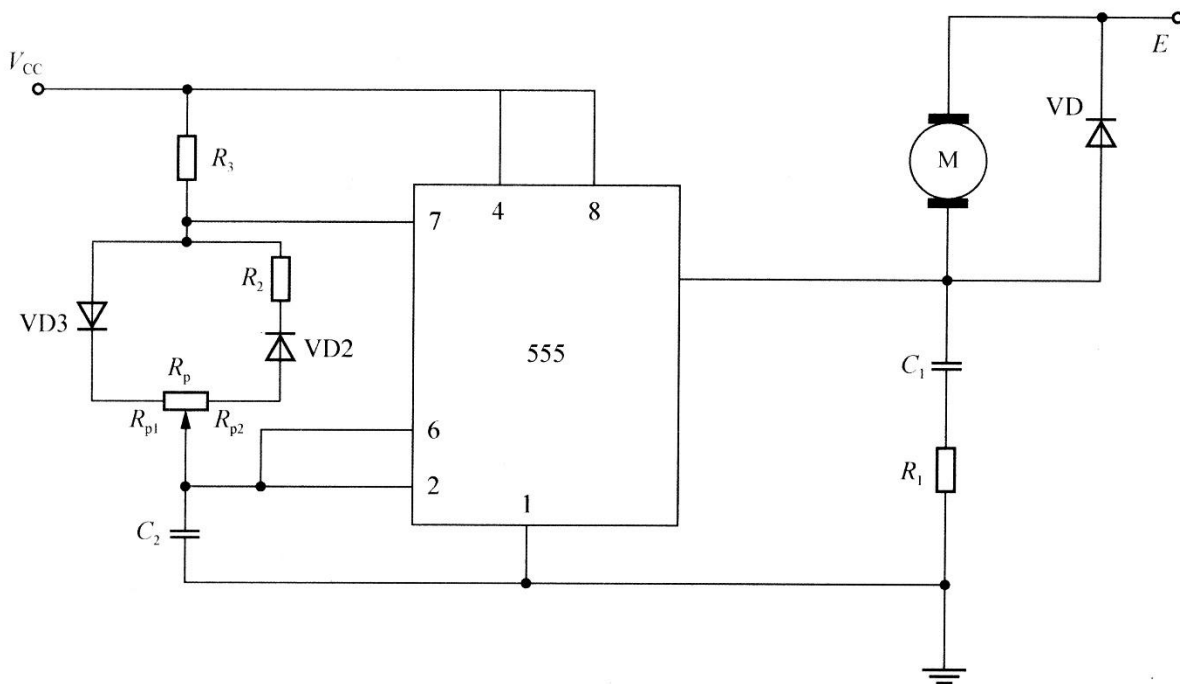


图 5. 36 直流电动机单向启停控制电路

当555输出高电平时，电机电枢绕组不能得到有效电压驱动，当输出低电平时，可以得到有效电压驱动，通过调节555输出方波的占空比即可调节电机转速。方波占空比越小，低电平时间越长，驱动电流越大，转速加快，反之亦然。

## 5. 基于单片机的直流电机双向运转PWM调速控制电路

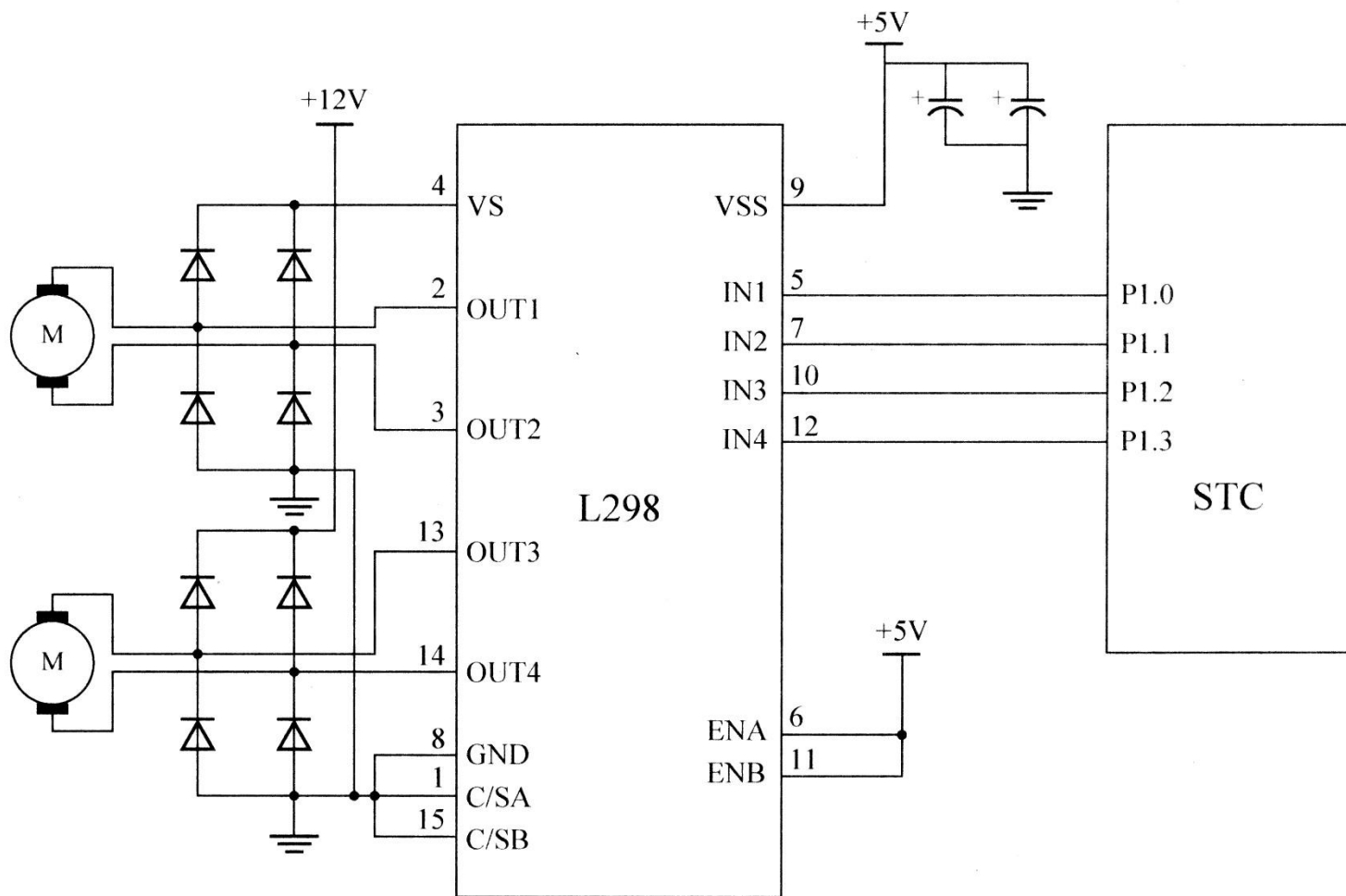


图 5.39 直流电动机双向运转 PWM 调速控制电路

## 6. 基于可编程器件的直流电机控制电路

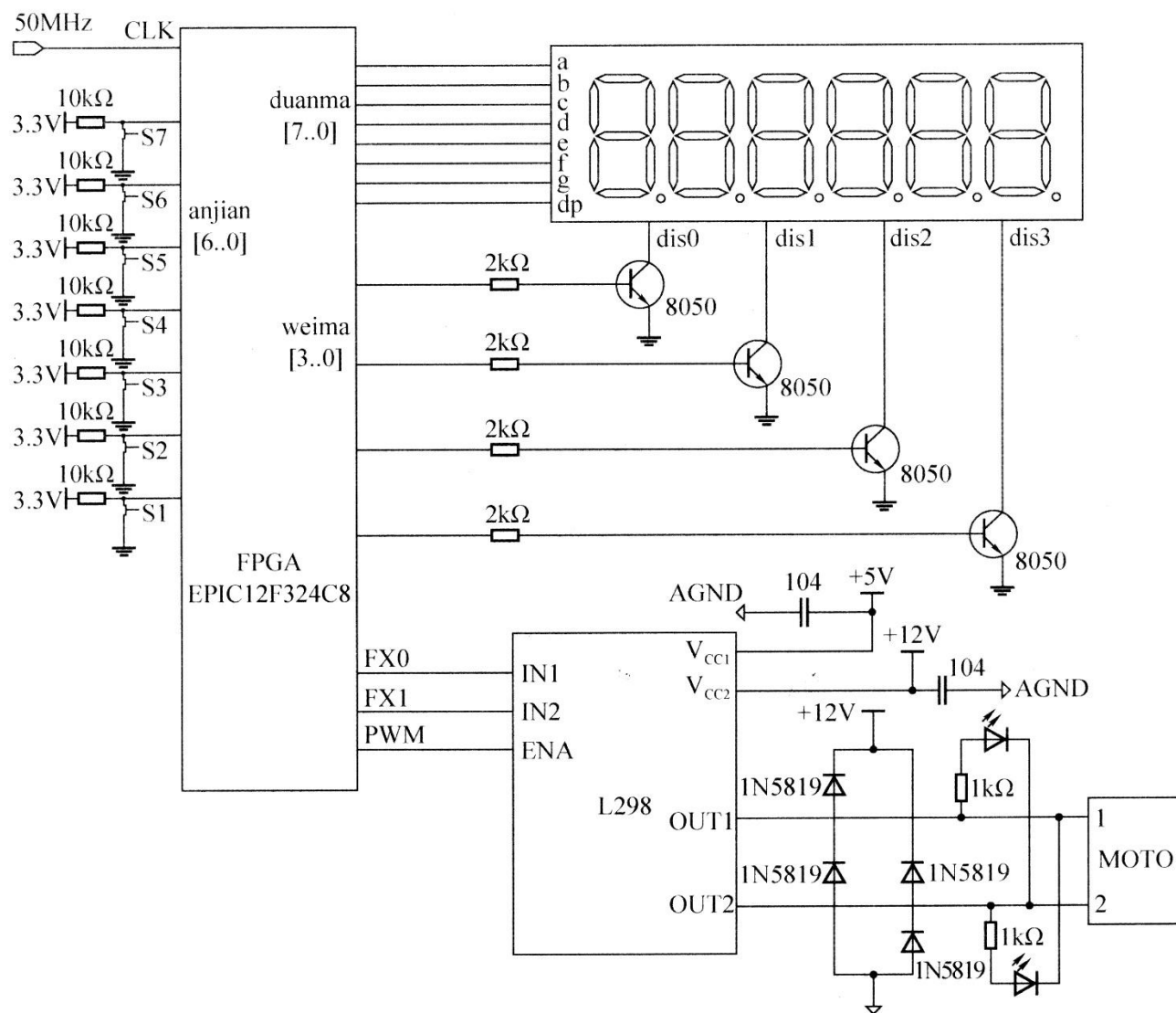


图 5.40 FPGA 控制的直流电动机 PWM 调速电路



## 本章小结

- 1、直流电动机的工作原理、电动势平衡方程式、转矩平衡方程式、功率平衡方程式的含义；
- 2、他励直流电动机的机械特性，转速跟电压、电枢绕组、磁通的关系；相应的调速方法；
- 3、直流电动机启动存在的问题，常用的启动方法；
- 4、直流电动机的各种常用的驱动控制电路；

# 作业

习题五： 四-1， 四-3

交作业时间： 4月7日23点前，学在浙大平台上提交