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。（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

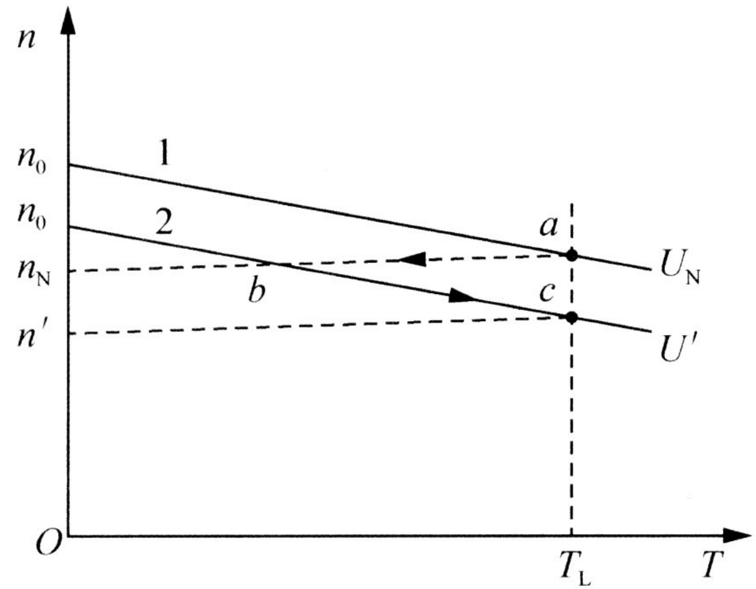


图 5.22　降低电枢电压调速

（1）工作时电枢电压不允许超过 U_N，而 $n \propto U$，所以调速只能是基速以下调速。

（2）平滑、无级调速，且不影响机械特性。

（3）调速幅度较大；直流拖动系统中被广泛应用；

2. 电枢串电阻调速

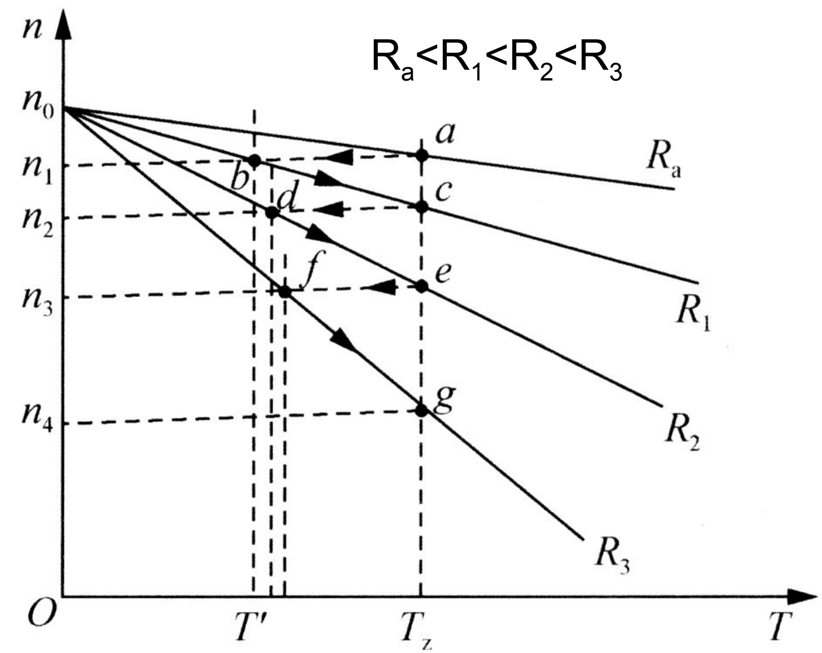


图 5.23 电枢串电阻调速

电源电压和励磁不变，改变电枢阻值

$$U = I_a R + E_a = I_a R + C_e \Phi n$$

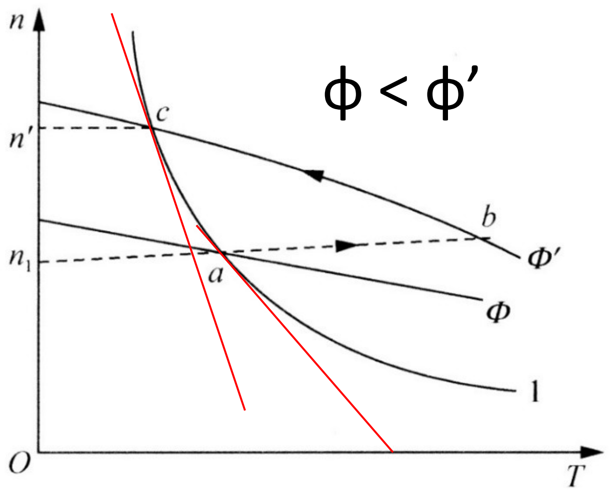
（1）调速只能向下调，且影响机械特性，尤其在低速时。

（2）尽管方法及控制设备简单，但电枢回路串接电阻，能量消耗大，效率低；多只用于小容量电机调速。

3. 弱磁调速

在电机设计中，额定工作状态下磁通接近饱和，所以只能弱磁调速。

$$n = n_0 - \Delta n = \frac{U_N}{C_e \varnothing} - \frac{R_a}{C_e C_T \varnothing^2} T_e$$



$\phi < \phi'$

$$U = I_a R + E_a = I_a R + C_e \Phi n$$

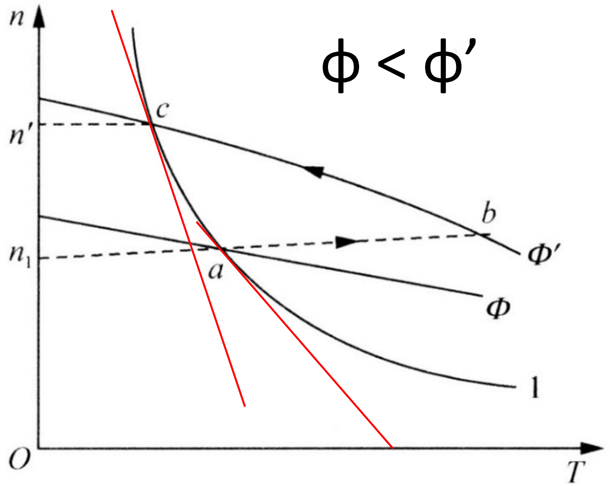
$$T_e = C_T \Phi I_a$$

1. 减小磁通 ϕ 后， n0 和 Δn 都会增加，但由于 Ra 很小，所以 n0 比 Δn 增加得快，导致 n 在弱磁时转速上升 。

2. 减小磁通 ϕ 导致斜率加大，机械特性变软，故较多应用于恒功率场合

3. 弱磁调速

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



调速过程：初始工作在 a 点，磁通由 φ 调至 φ’ 时， n 不能突变导致 C_e φ n 减小，随之 I_a 及相应的 T_e 增大，工作点从 a 移动到 b 。

n 增加，在电枢电压不变的情况下， I_a 和 T_e 逐渐减小，从 b 移动到 c ，并进入新平衡状态。

- 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。
- 弱磁使转速上调，但受电机温升的限制，转速不能太高。

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。

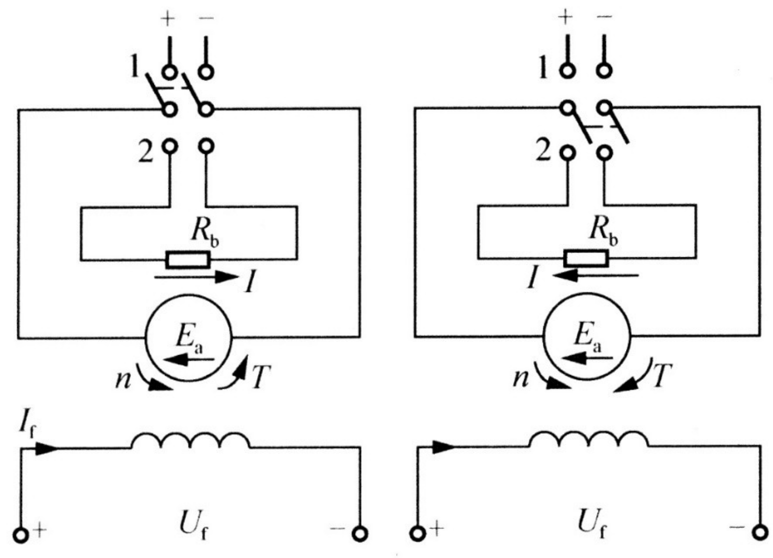


图 5.25 能耗制动电路原理图

制动前电流： $I_a = \dfrac{U_N - E_a}{R_a}$

制动时电流： $I_a = \dfrac{U_N - E_a}{R_a + R_b} = \dfrac{-E_a}{R_a + R_b}$

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。

(2) 制动过程

① 反抗性恒转矩负载： A→B→O

② 位能型恒转矩负载（起重机）： A→B→C

(3) 特点：制动转矩较小，一般与机械制动配合使用。

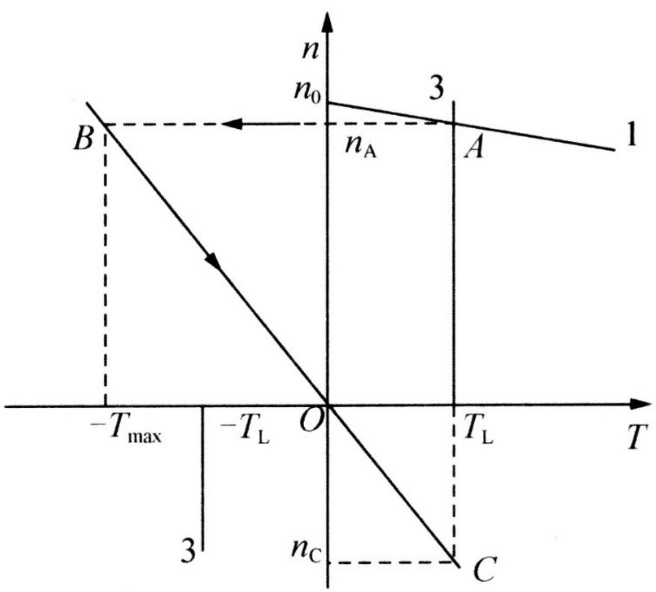
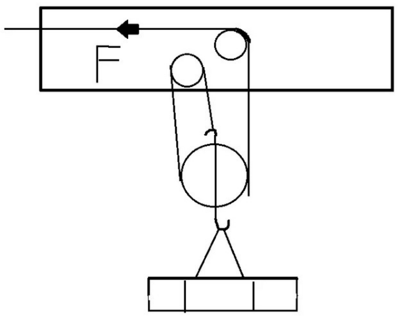


图 5.26 能耗制动机械特性



2. 反接制动

(1) 制动原理

带位能性恒转矩负载的电动机，电枢反接的制动工作原理。

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：

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

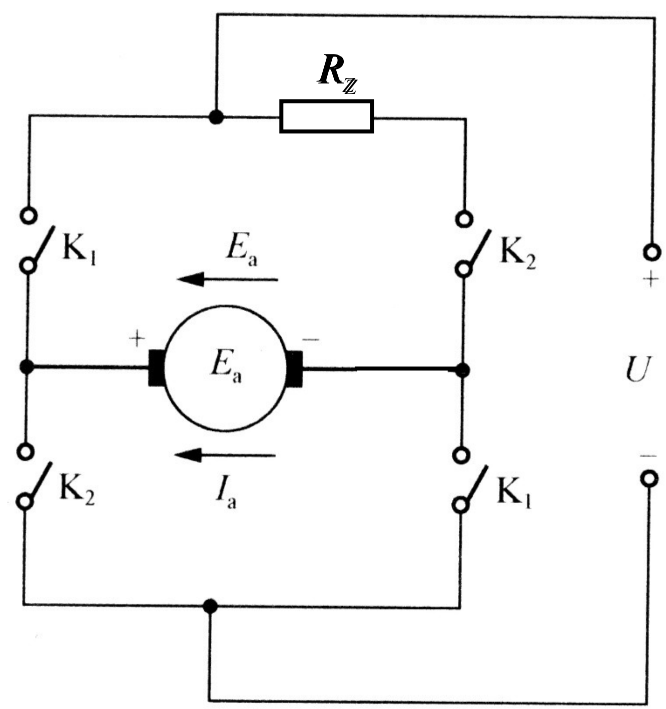


图 5.27 电枢反接制动电路图

(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。

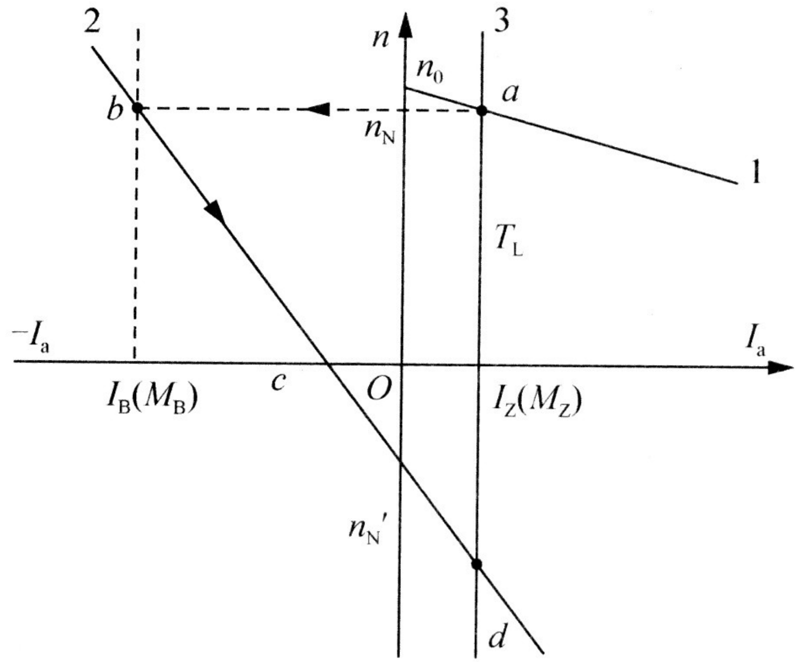


图 5.28 电枢反接制动机械特性

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

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**。

(2) 制动过程（电车下坡）： a→b

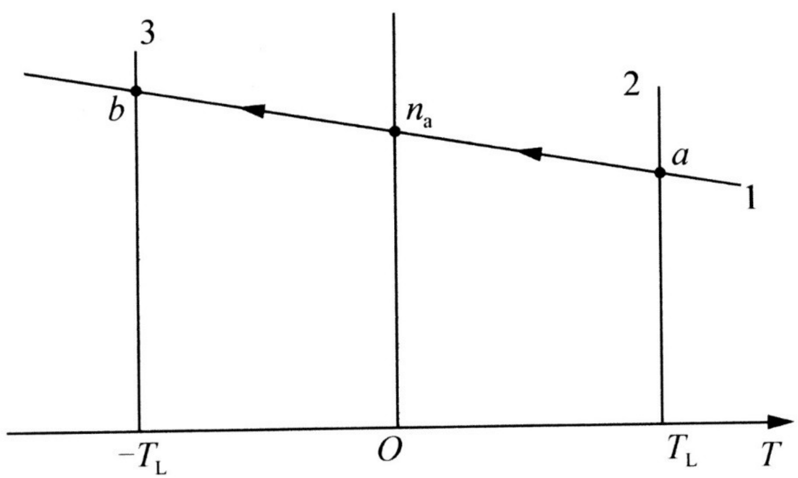


图 5.29　回馈制动机械特性

(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（因为只有 $n>n_0$ 时才能回馈制动）

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？

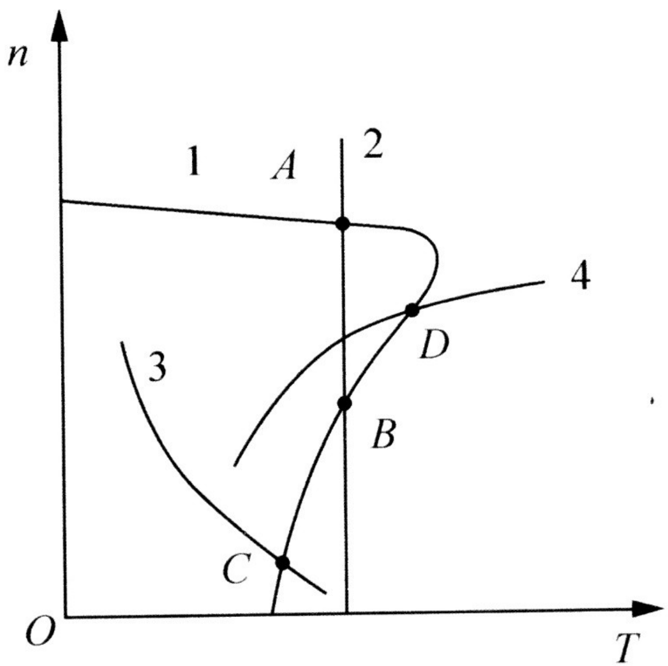


图 5. 30　电动机的机械特性

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 0.3Ω 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？

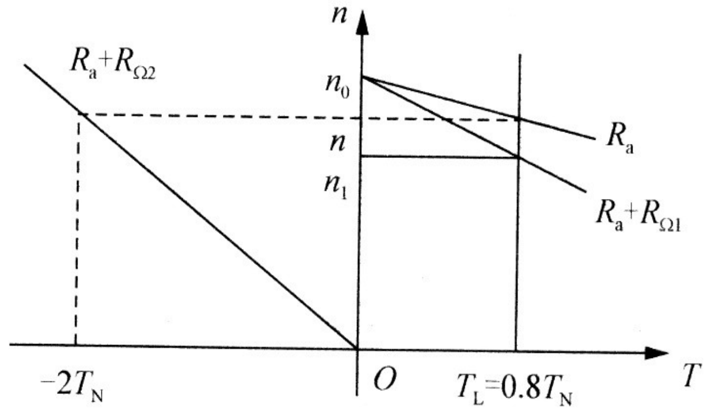


图 5.31 他励直流电动机机械特性

解：

$$①C_e\Phi_N=\frac{U_N-I_NR_a}{n_N}=\frac{220-158.8\times0.1}{1000}=0.20412$$

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

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

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

$$②n=\frac{U_N-I_aR_a}{C_e\Phi_N}=\frac{220-0.8\times158.8\times0.1}{0.20412}=1015.56(\text{r/min})$$

$$③n=\frac{U_N-I_a(R_a+R_{\Omega1})}{C_e\Phi_N}=\frac{220-0.8\times158.8\times(0.1+0.3)}{0.20412}=828.85(\text{r/min})$$

$$④\quad R_{\Omega2}=\frac{U-C_e\Phi_Nn_N}{I_a}-R_a=\frac{0-0.20412\times1015.56}{-2\times158.8}-0.1=0.5527\ (\Omega)$$

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

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

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。

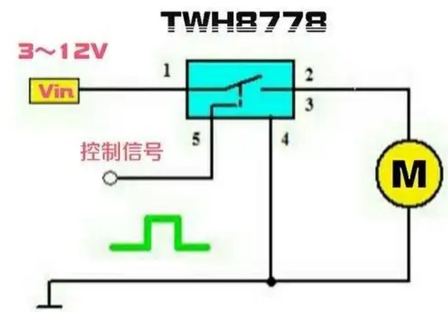
包括：

（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？

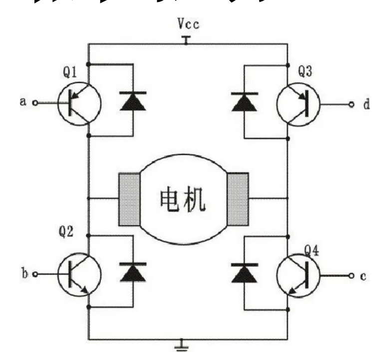
单向转动：一个大功率三极管或场效应管；

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

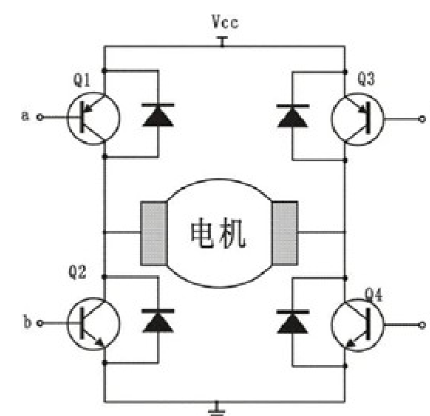
① 输出电流和电压范围

② 效率，保证功率管开关工作状态（硬开关、软开启、软关断）

③ 功率电路对控制输入端的影响，控制电路输入高阻抗或光电耦合

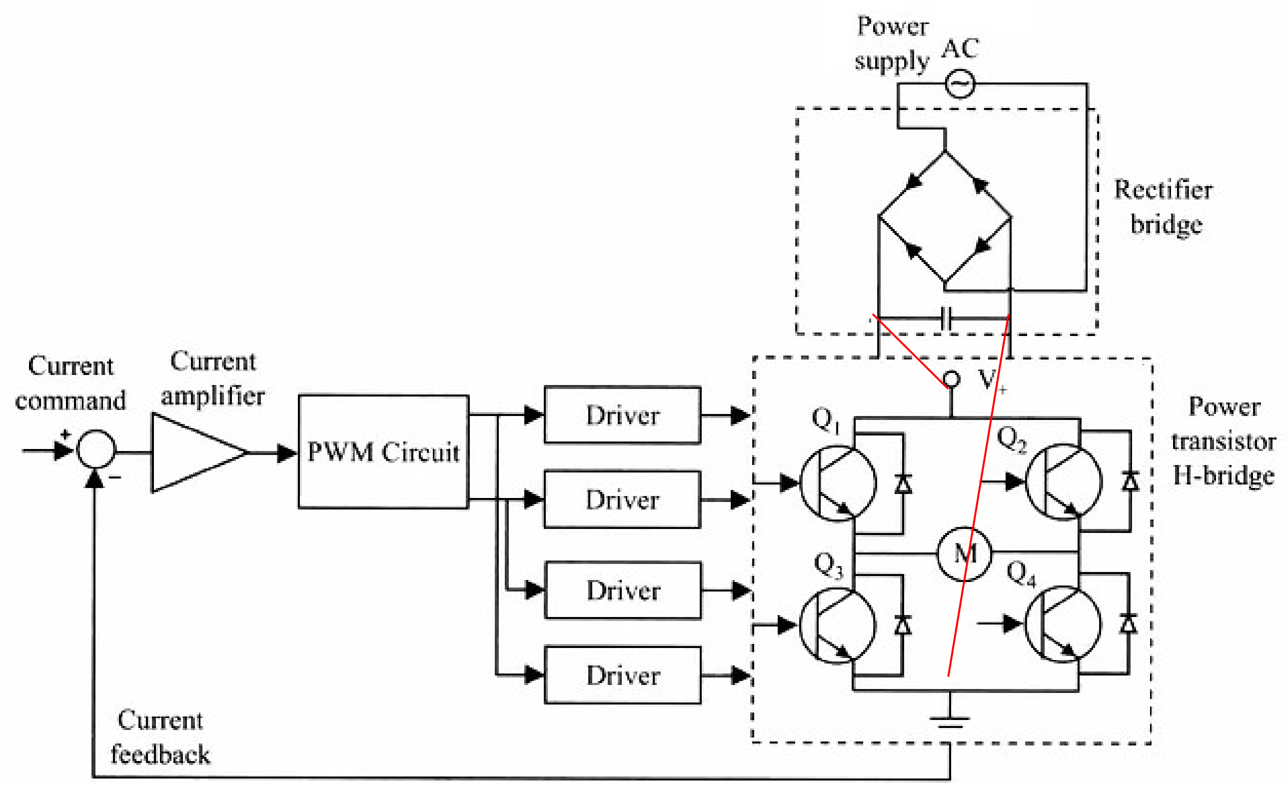
④ 对电源的影响，注意共态导通问题

⑤ 可靠性



Drivers for DC Brush-type and Brushless Motors

The most common type of power stage amplifier used for DC brush-type motors is an H-bridge amplifier.



（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。

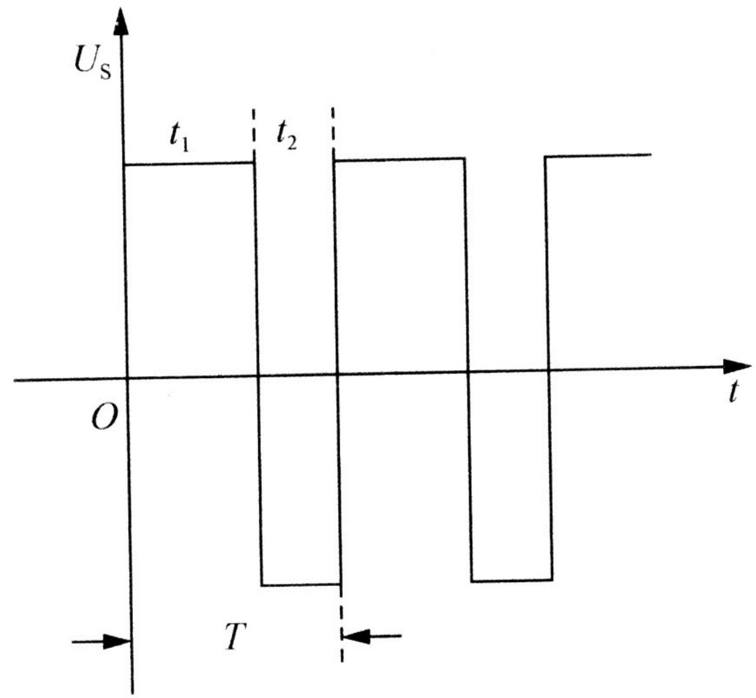
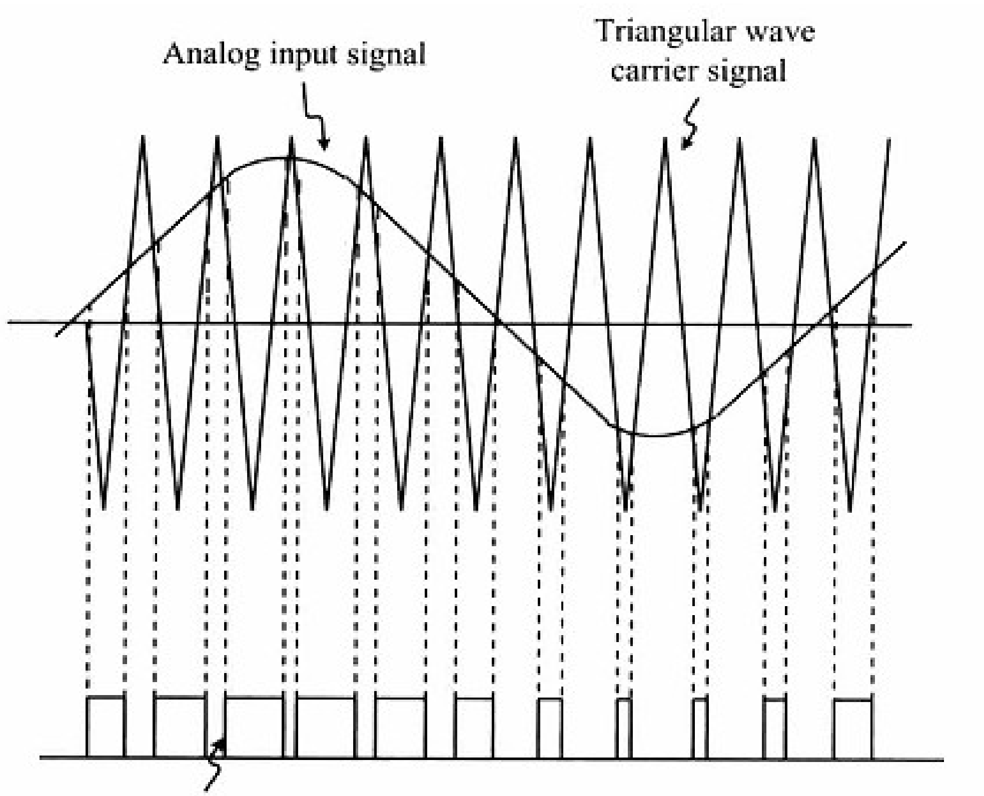


图 5.32　PWM调速波形图

$$U_{av}=\frac{t_1}{t_1+t_2}U_S=\frac{t_1}{T}U_S=\alpha U_S$$

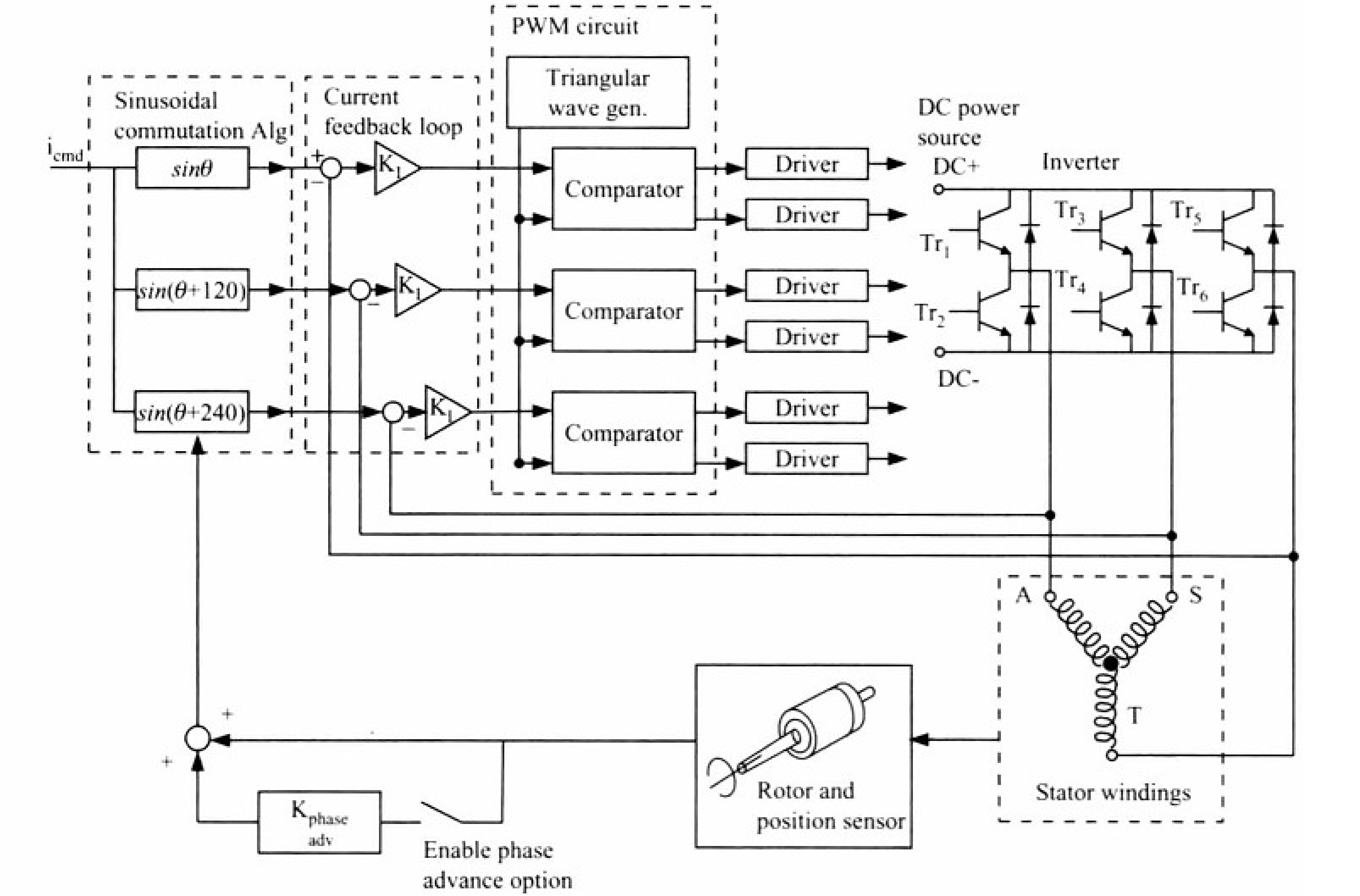
The PWM circuit converts an analog input signal to a fixed frequency but variable pulse width signal.



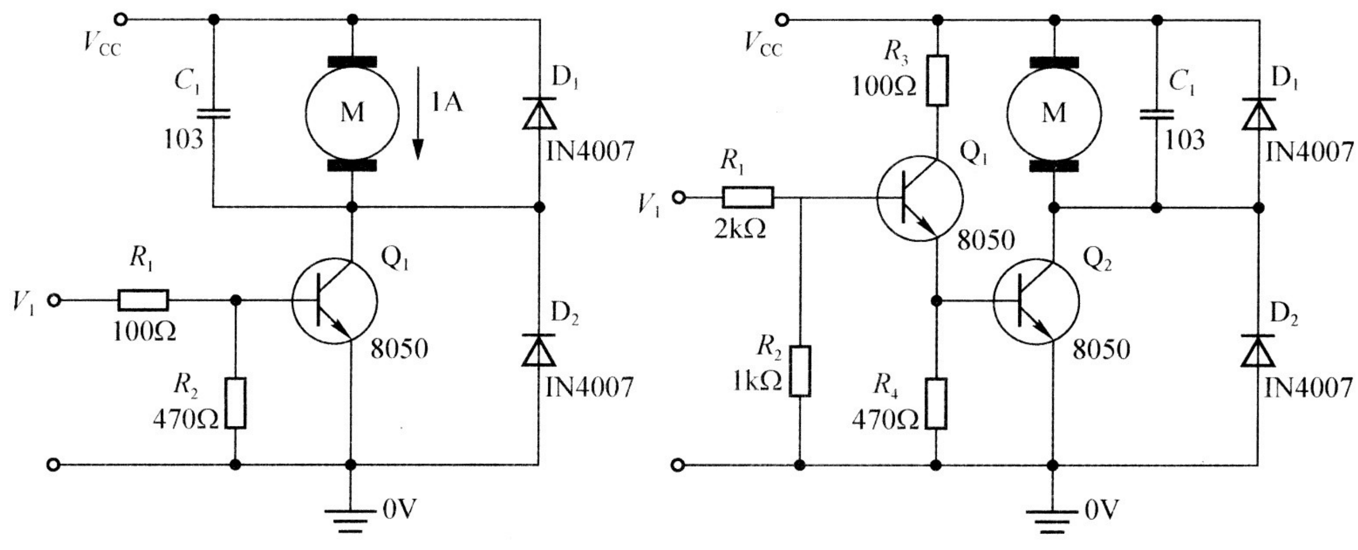
By modulating the ON-OFF time of the pulse width at a high switching frequency, hence the name “pulse width modulation”

FIGURE 8.32: PWM circuit function: Carrier signal is a high-frequency triangular signal. The input signal is an analog signal value. The output pulse has fixed frequency, which is the carrier frequency. The ON/OFF pulse width is varied as a function of the value of the input signal relative to the carrier signal.

A current-controlled drive for a 3-phase brushless DC motor.



2. 直流电机单向起停驱动电路



(a) (b)

(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

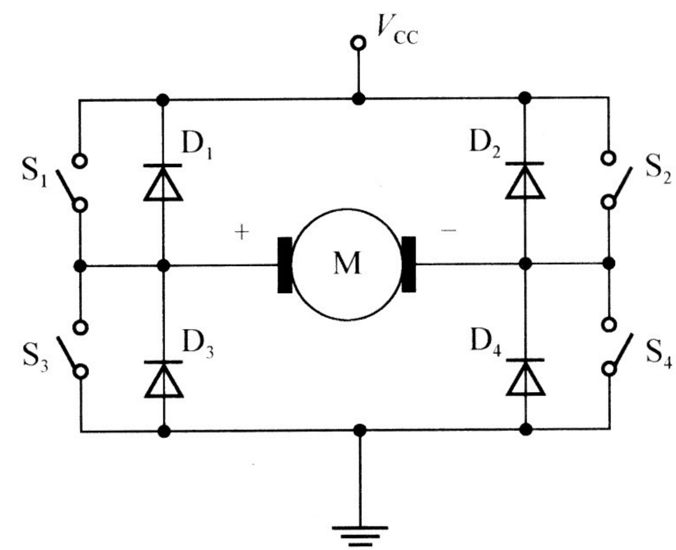
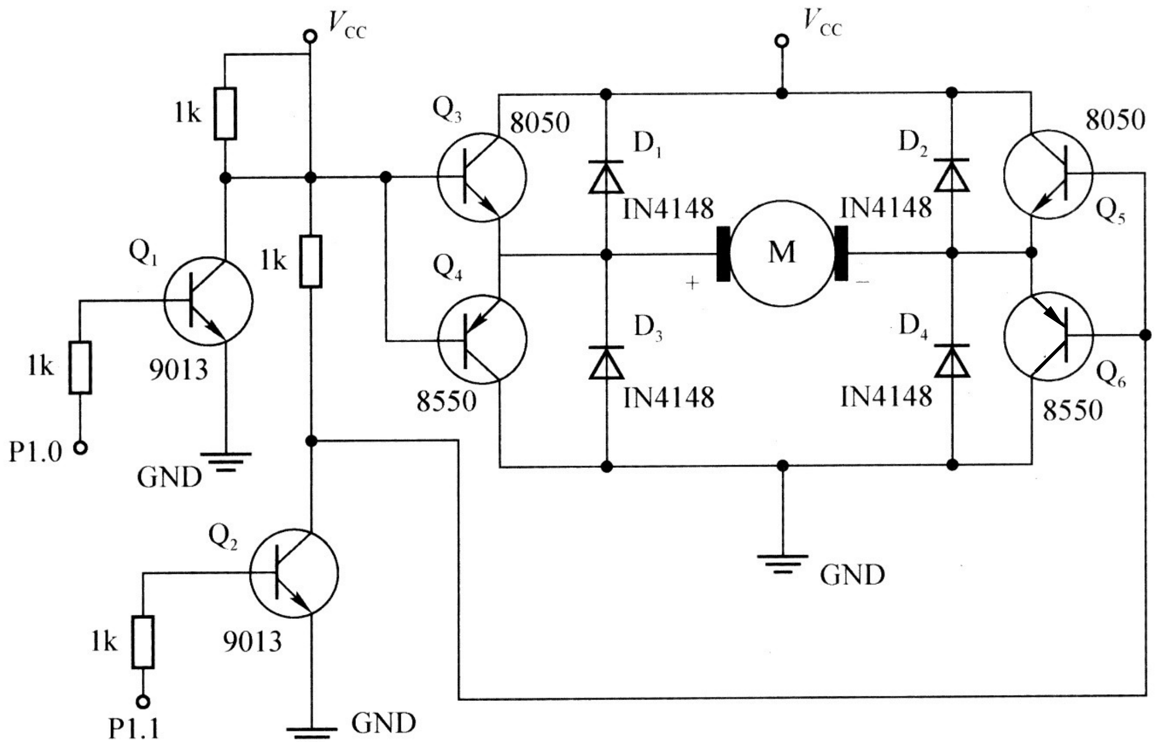


图 5.34　直流电动机 H 型全桥控制电路原理图

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



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；

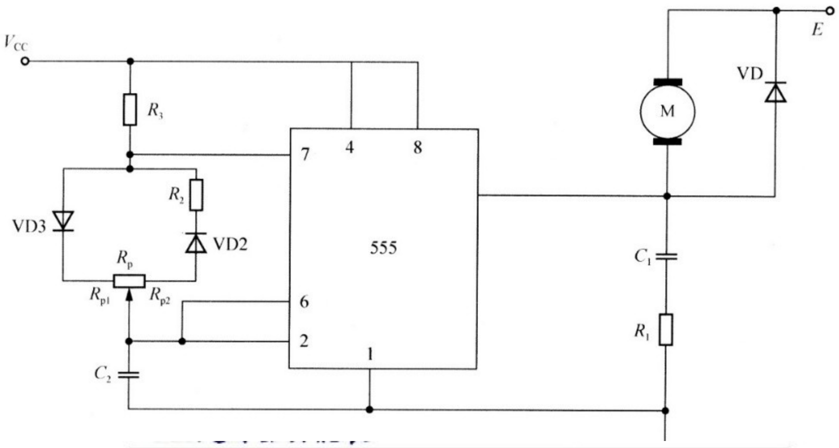
② 直流电动机通过的电流与电动机直接接电源相比，也不应该降低太多；

③ 功率管在长时间满负荷工作时，元件不应该烫手。

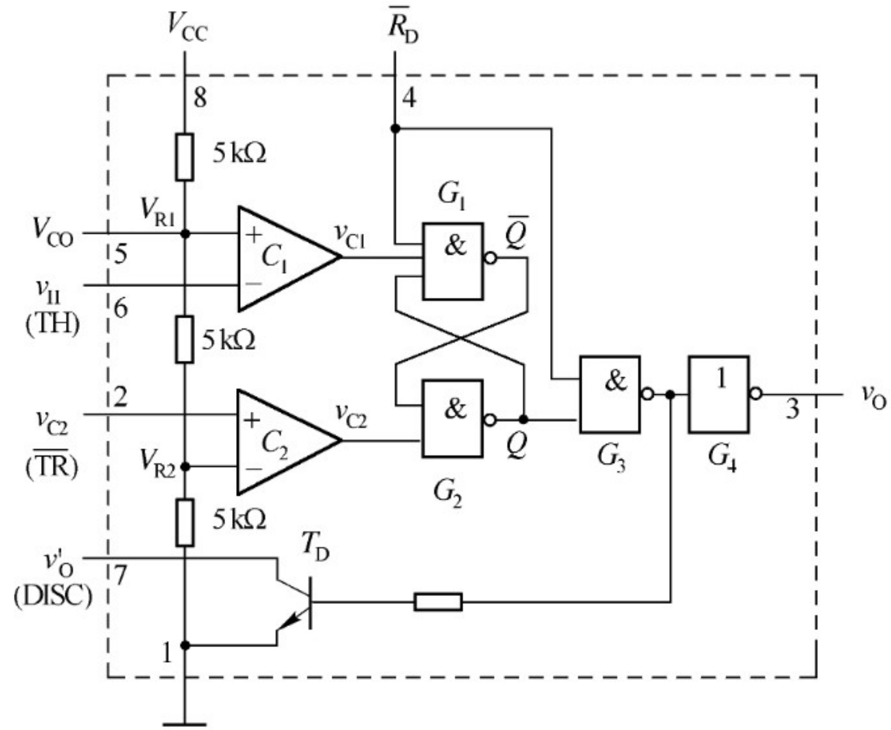
(4) 集成 H 桥驱动电路

L293D 、 L298N 、 TA7257P 、 SN754410 等

4. 直流电机单向运转PWM调速驱动电路



输入			输出	
阈值输入(V_{I1})	触发输入(V_{I2})	复位(R_D)	输出(V_O)	放电管T
×	×	0	0	导通
$<\frac{2}{3}V_{CC}$	$<\frac{1}{3}V_{CC}$	1	1	截止
$>\frac{2}{3}V_{CC}$	$>\frac{1}{3}V_{CC}$	1	0	导通
$<\frac{2}{3}V_{CC}$	$>\frac{1}{3}V_{CC}$	1	不变	不变



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

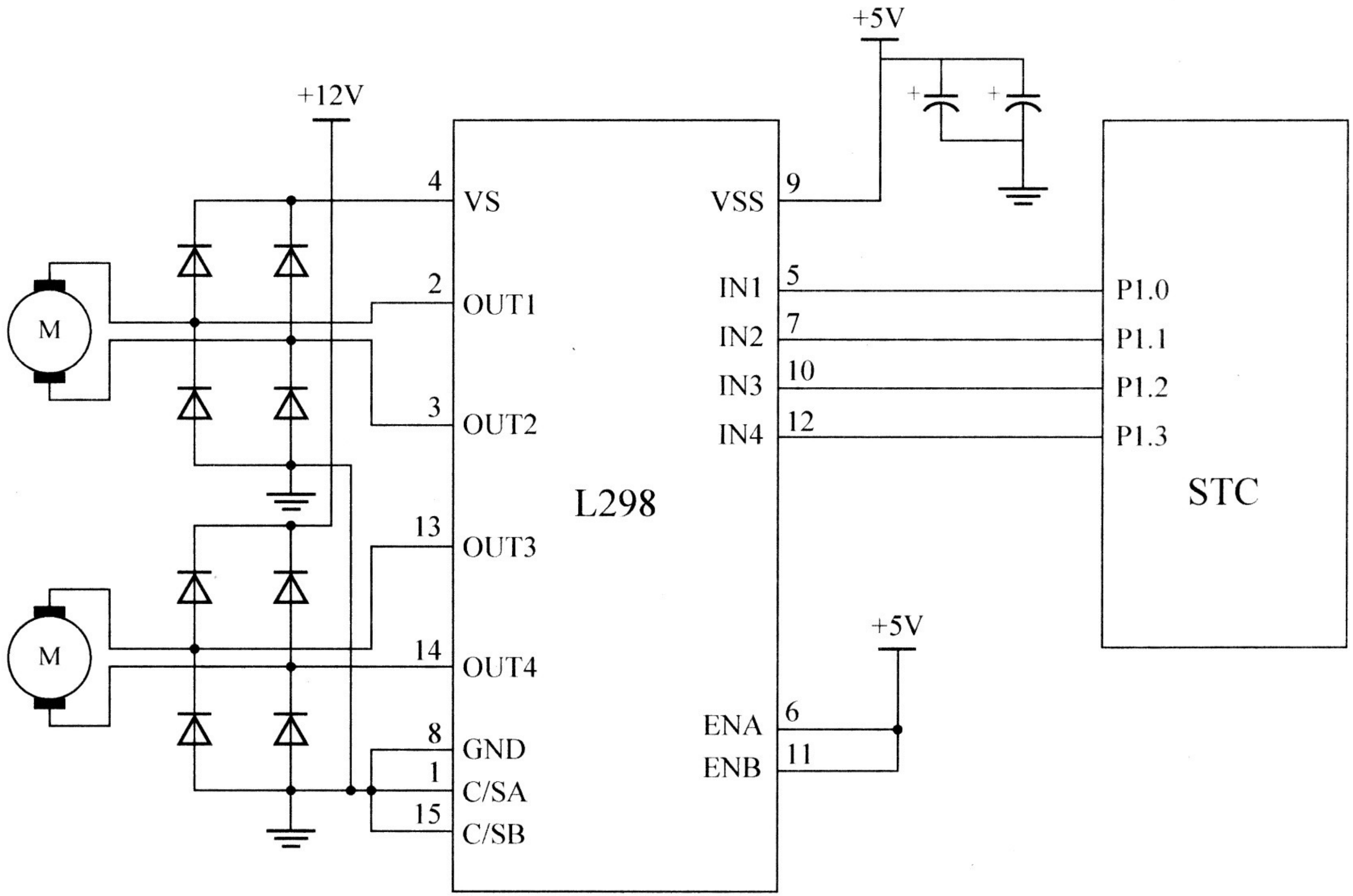


图 5.39　直流电动机双向运转 PWM 调速控制电路

6. 基于可编程器件的直流电机控制电路

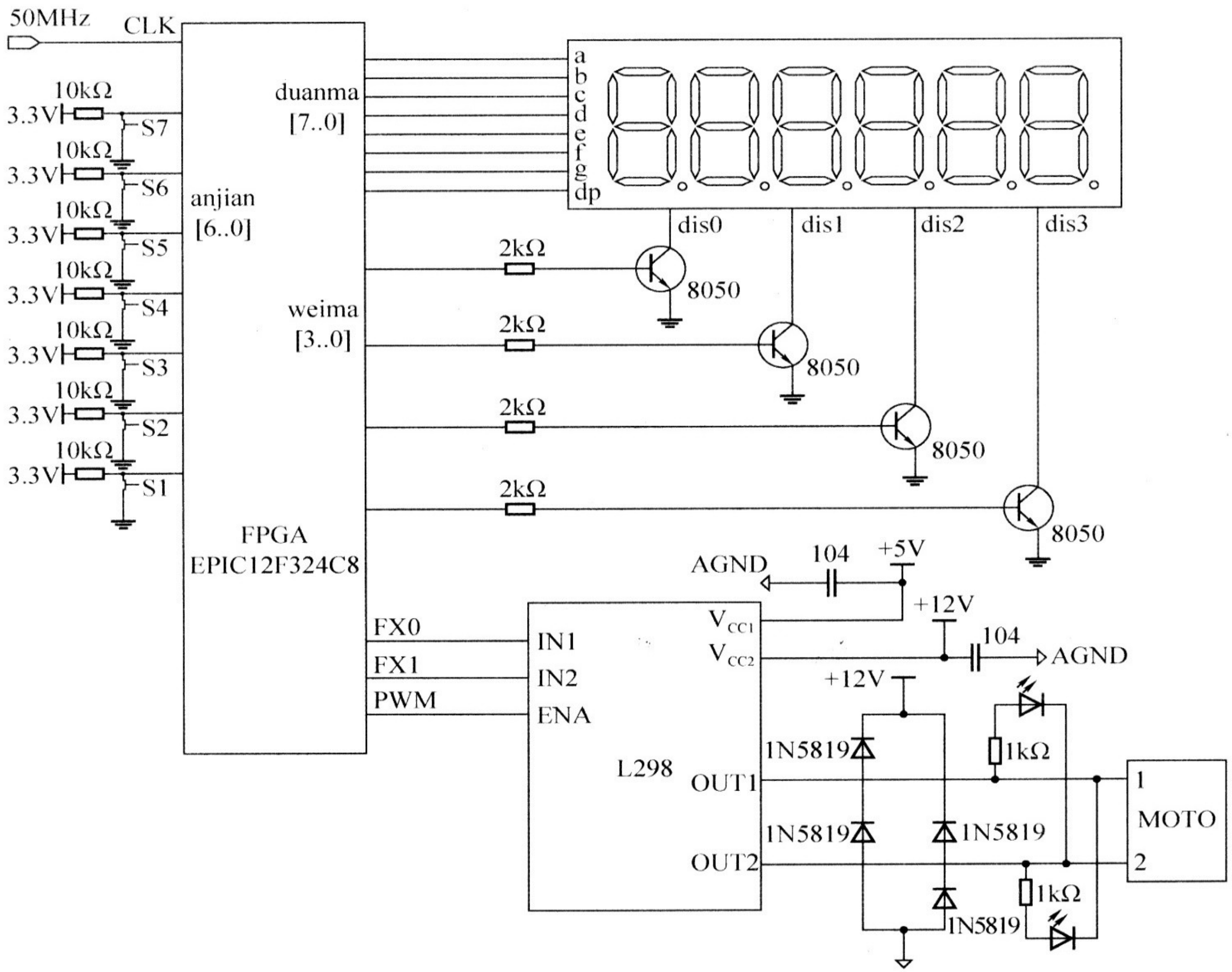


图 5. 40 FPGA 控制的直流电动机 PWM 调速电路

DC Motor: Electromechanical Dynamic Model

The most commonly used model for a DC electric motor.

The electrical relation between terminal voltage, current, and rotor speed is:

$$V_t(t) = L_a \frac{di(t)}{dt} + R_a i(t) + K_e \cdot \dot{\theta}(t)$$

The electrical-to-mechanical power conversion is given by:

$$T_m(t) = K_T\, i(t)$$

K_T is the torque gain

T_m is the torque generated by motor

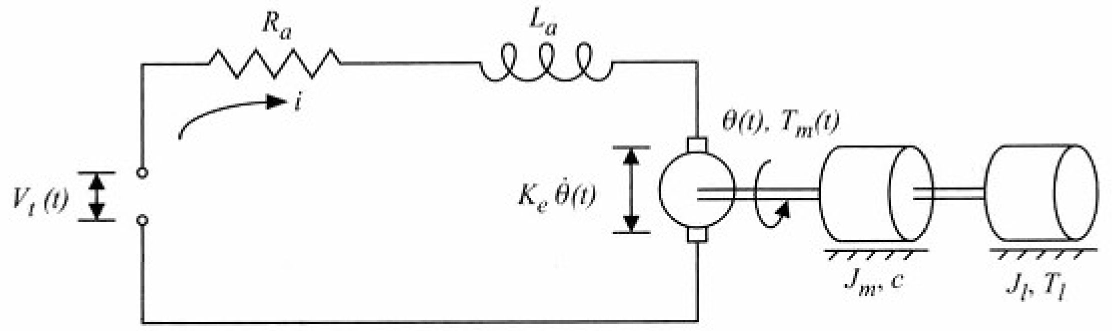


FIGURE 8.69: DC motor dynamic model.

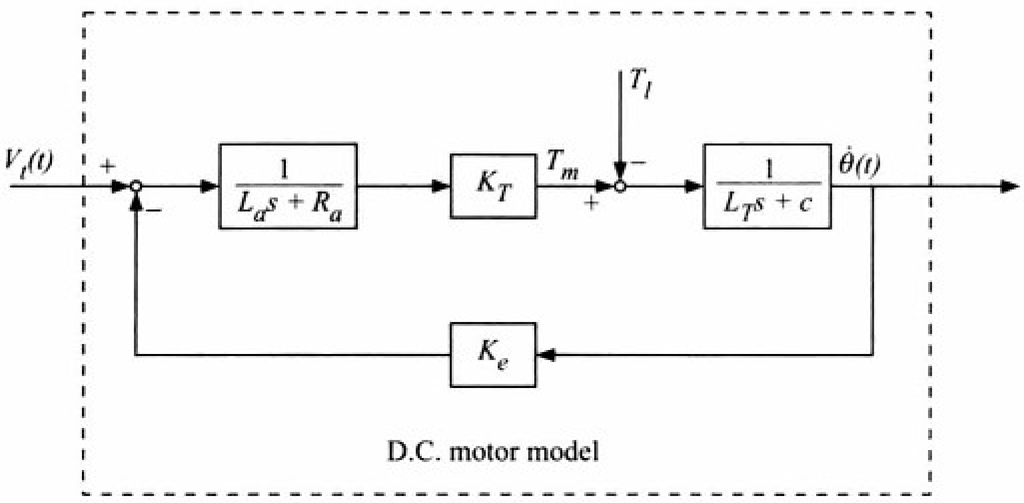


FIGURE 8.70: Block diagram of DC motor dynamic model.

Finally the mechanical relation between torque, inertia, and other load is given by

$$T_m(t) = (J_m + J_l)\,\ddot{\theta} + c\,\dot{\theta}(t) + T_l(t)$$

Taking the Laplace transform of the above equation for zero initial conditions

$$V_t(s) = (L_a s + R_a)i(s) + K_e\dot{\theta}(s)$$

$$\rightarrow i(s) = \frac{1}{L_a s + R_a}[V_t(s) - K_e\dot{\theta}(s)]$$

$$T_m(s) = K_T i(s)$$

$$(J_T s + c)\dot{\theta}(s) = T_m(s) - T_l(s)$$

where $J_T = J_m + J_l$.

The transfer function describing the effect of terminal voltage and load torque on the motor speed can be found as:

$$\dot{\theta}(s) = \frac{K_T}{(J_t s + c)(L_a s + R_a) + K_T K_e} V_t(s) - \frac{(L_a s + R_a)}{(J_t s + c)(L_a s + R_a) + K_T K_e} T_l(s)$$

The transfer function from motor terminal voltage to motor speed:

$$\begin{aligned}
\frac{\dot{\theta}(s)}{V_t(s)} &= \frac{K_T}{(J_t s + c)(L_a s + R_a) + K_T K_e} \\
&= \frac{K_T}{J_T L_a s^2 (L_a c + J_T R_a) s + (c R_a + K_T K_e)} \\
&= \frac{K_T}{J_T L_a s^2 + \left(\frac{L_a c + J_T R_a}{J_T L_a}\right) s + \left(\frac{c R_a + K_T K_e}{J_T L_a}\right)}
\end{aligned}$$

The poles of the transfer function are given by:

$$s^2 + \left(\frac{L_a c + J_T R_a}{J_T L_a}\right) s + \left(\frac{c R_a + K_T K_e}{J_T L_a}\right) = 0$$

Normally, this equation has 2 complex conjugate roots.

Special Case: DC Servo Motors

$$s^2 + \left(\frac{L_a c + J_T R_a}{J_T L_a}\right) s + \left(\frac{c R_a + K_T K_e}{J_T L_a}\right) = 0$$

They have very low inductance (L small) and damping (c small).

The transfer function can be approximated as

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{V_t(s)} \simeq \frac{\dfrac{K_T}{J_T L_a}}{s^2 + (\dfrac{R_a}{L_a})s + (\dfrac{K_T K_e}{J_T L_a})}$$

The motor speed is also influenced by disturbance or load torque.

$$\dot{\theta}(s) = \frac{\dfrac{1}{K_e}}{(\tau_m s + 1)(\tau_e s + 1)} V_t(s) - \frac{\dfrac{1}{K_e}\dfrac{R_a}{K_T}}{(\tau_m s + 1)} T_l(s)$$

$$\tau_m = -\frac{1}{p_1} = \frac{J_T R_a}{K_T K_e} \quad \text{mechanical time constant}$$

$$\tau_e = -\frac{1}{p_2} = \frac{L_a}{R_a} \quad \text{electical time constant}$$

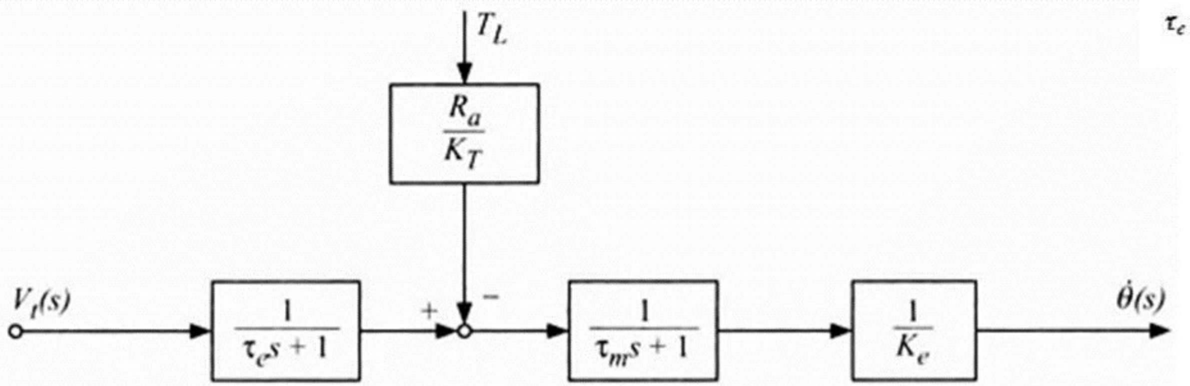


FIGURE 8.71: Block diagram of the relationship between motor terminal voltage and load torque to motor speed for a typical DC servo motor.

Voltage Amplifier Driven DC Motor

If a voltage amplifier is used to drive the motor:

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{\dot{\theta}(s)}{V_t(s)} \frac{V_t(s)}{V_{in}(s)} = G_{amp}(s) G_{motor}(s)$$

Where the voltage amplifier is represented by a first-order filter model:

$$\frac{V_t(s)}{V_{in}(s)} = G_{amp}(s) = \frac{A_v}{(\tau_a s + 1)}$$

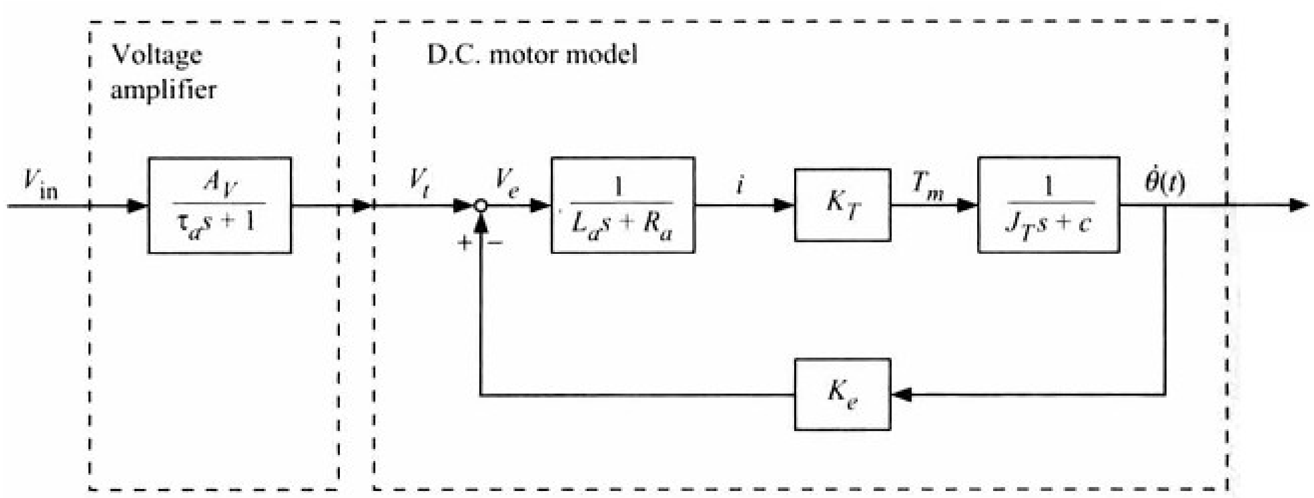


FIGURE 8.72: Block diagram of transfer functions for a DC servo motor by a voltage amplifier

Current Amplifier Driven DC Motor

In the majority of cases, the d.c. motor terminal voltage is controlled by an amplifier which regulates armature

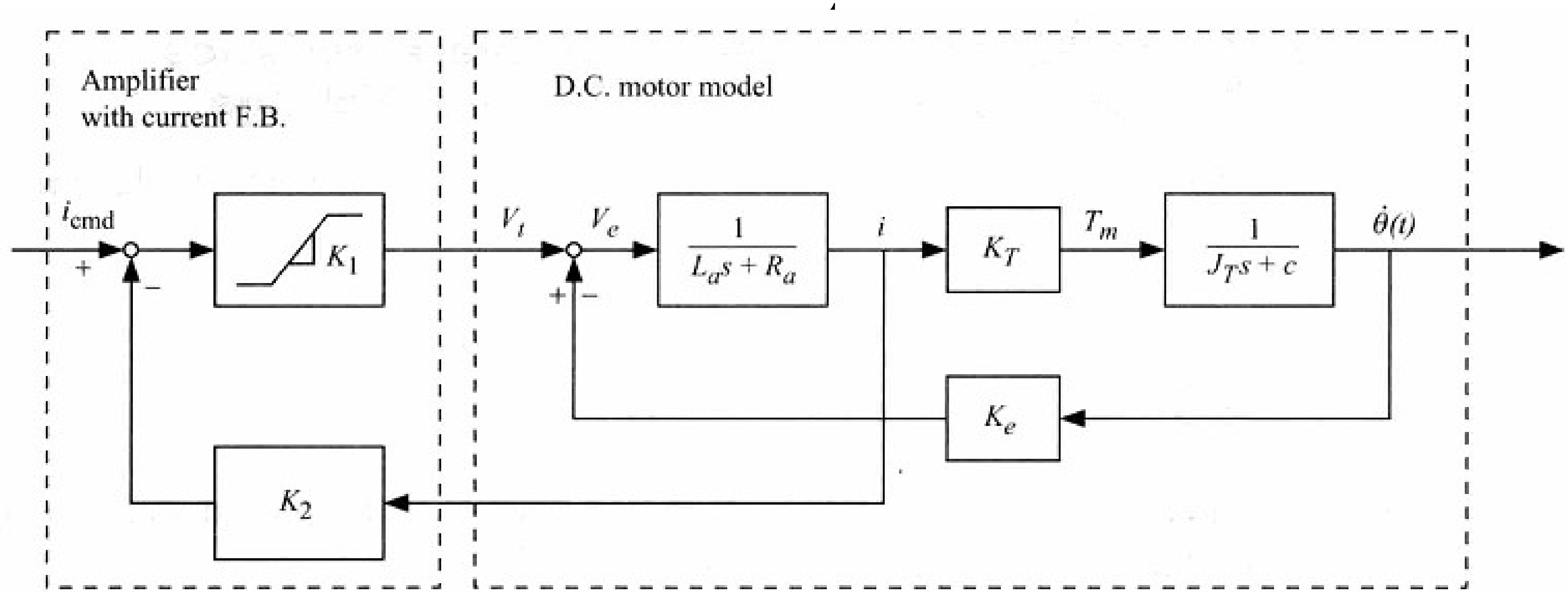


FIGURE 8.73: Block diagram of DC motor and amplifier using current feedback.

用于转矩调节的电流闭环

$$\frac{\dot{\theta}(s)}{i_{cmd}(s)} = \frac{K_1 \frac{K_T}{(L_a s+R_a)(J_T s+c)+K_e K_T}}{1 + K_1 \frac{K_T}{(L_a s+R_a)(J_T s+c)+K_e K_T} K_2 \left(\frac{J_T s+c}{K_T}\right)}$$

$$= \frac{\frac{K_1 K_T}{L_a J_T}}{s^2 + \left(\frac{L_a c+R_a J_T s+K_1 K_2 J_T}{L_a J_T}\right) s + \left(\frac{K_e K_T+K_1 c+K_1 K_2 c}{L_a J_T}\right)}$$

$$= \frac{K}{s^2 + bs + c} = \frac{K_a}{(\tau_a s + 1)} \frac{K_T}{(J_T s + c)}$$

If we consider the transfer function between armature current and motor speed:

$$T_m(t) = K_T i(t)$$

$$T_m(t) = J_T \ddot{\theta} + c\dot{\theta} - T_l(t)$$

$$\dot{\theta}(s) = \frac{K_T}{(J_T s + c)} i(s) - \frac{1}{(J_T s + c)} T_l(s)$$

联立消掉可得

i_{cmd} 与 i 的关系

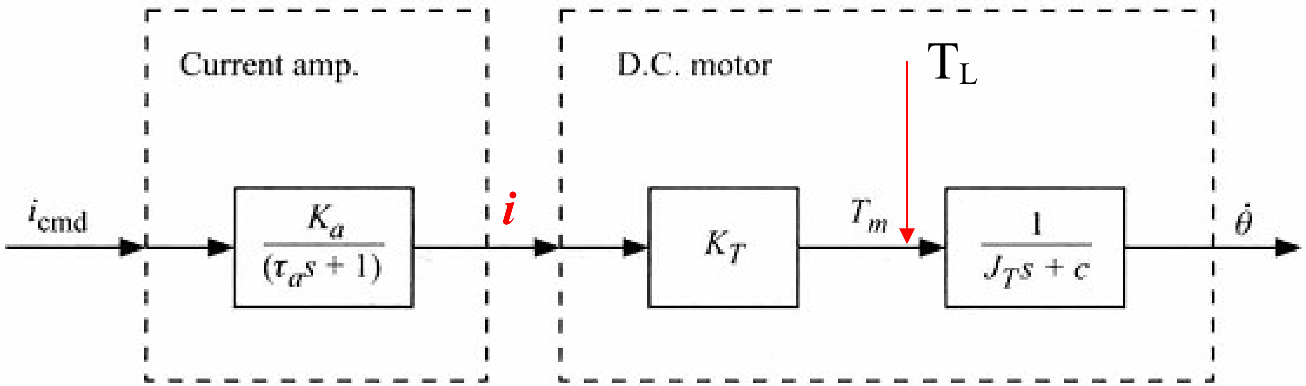


FIGURE 8.74: Current amplifier plus DC motor transfer function from commanded current to motor speed.

Steady-State Torque-Speed Characteristics of a DC motor under Constant Terminal Voltage

Consider the electrical and electrical-to-mechanical power conversion relations for a d.c. motor:

$$V_t(t) = L_a \frac{di}{dt} + R_a i + K_e \dot{\theta}(t)$$

$$T_m(t) = K_T i(t)$$

In steady state:

$$T_m(t) = \frac{K_T}{R_a} V_t(t) - \frac{K_T K_e}{R_a} \dot{\theta}(t)$$

This is a linear relationship of the type:

$$y = -ax + b$$

Consider the equation for various constant terminal voltage values V_{ti}.

$$T_m(t) = \frac{K_T}{R_a} V_t(t) - \frac{K_T K_e}{R_a} \dot{\theta}(t)$$

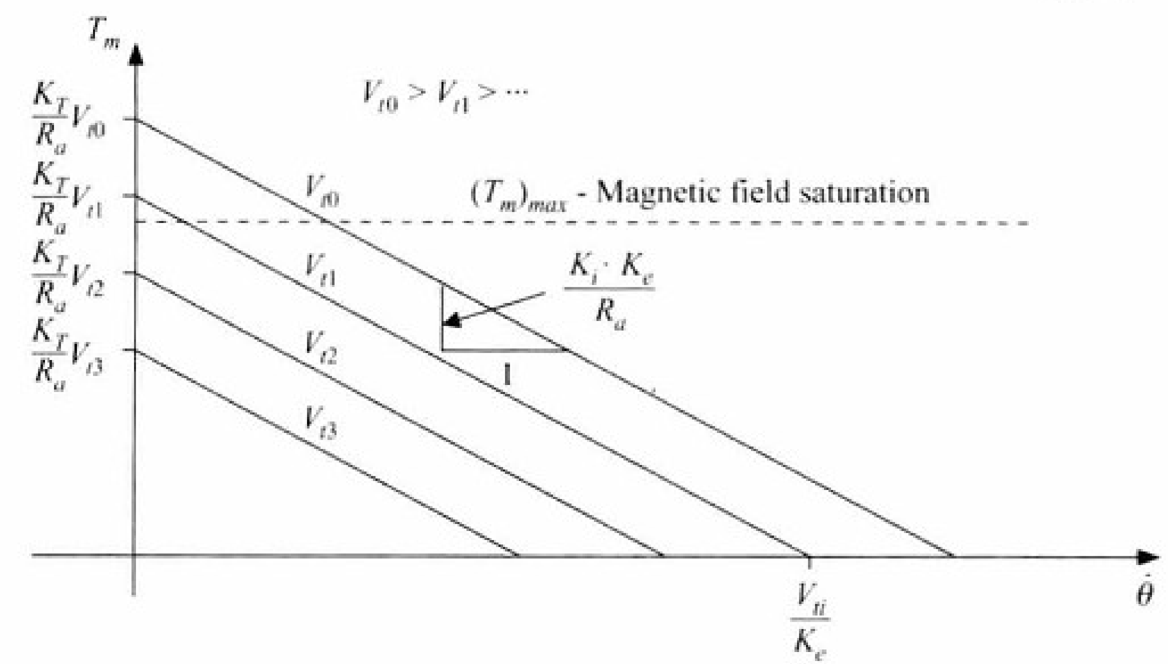


FIGURE 8.75: Steady-state torque-speed characteristics of a DC motor.

Steady-State Torque-Speed Characteristics of a DC motor and Current Amplifier

When we consider a DC motor driven by a current amplifier, we need to consider the following additional relation.

$$V_t(t) = K_1[i_{cmd}(t) - K_2 i(t)]$$

When the amplifier saturates,

$$V_t(t) = V_{\max}$$

The steady-state torque-speed curve for the d.c. motor under current amplifier control,

$$T_m = \frac{K_T K_1}{R_a + K_1 K_2} i_{cmd} - \frac{K_T K_e}{R_a + K_1 K_2} \dot{\theta}$$

$$T_m(t) = \frac{K_T}{R_a} V_t(t) - \frac{K_T K_e}{R_a} \dot{\theta}(t)$$

$$T_m(\mathrm{t}) = K_T i(\mathrm{t})$$

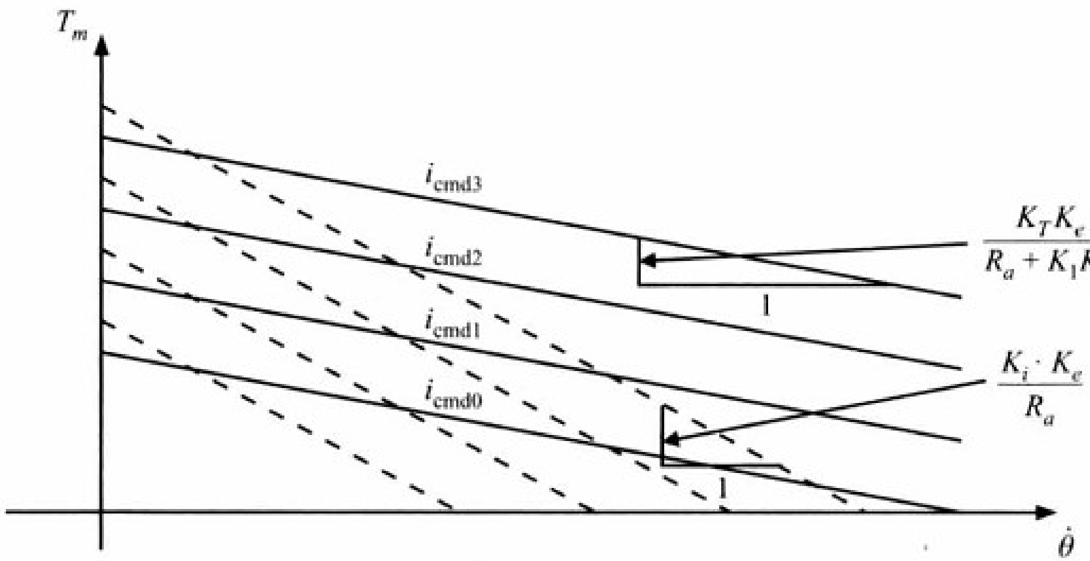


FIGURE 8.76: Speed-torque characteristics of a DC motor in steady state with current-controlled amplifier.

The steady-state torque produced by a DC motor under constant current conditions decreases with increasing speed at a much slower rate than the case when the motor is controlled by a voltage amplifier under constant terminal voltage condition.

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

3 月 29 号上交