

反应式步进电机的快速控制问题*

夏莹 孙承鉴
(清华大学计算机系)

摘 要

反应式步进电机是将电脉冲变成角位移或位移的元件,在数字控制和计算机控制中有着广泛的应用。实践中要求步进电机不仅能快速运转,而且要求步进电机能快速启、停。

为了提高步进电机的快速性,当然步进电机本身的性能起着重要的作用,而合理的驱动电路和控制方式会使步进电机充分发挥效能,达到它可能的最高指标。本文分析了影响步进电机运转和启、停快速性的因素及启动和停止的动态过程;求出为了实现快速启、停所应加的理想控制脉冲规律,用简单的逻辑电路近似实现。

一、反应式步进电机的性能指标及影响步进电机快速性的因素

开环控制的步进电机框图如图1所示。为了正确使用步进电机,讨论它的快速运转和快速启停,首先需要对步进电机的性能有较深入的了解。为此这里把步进电机某些性能指标的含义作一说明,并讨论影响步进电机快速性的因素。

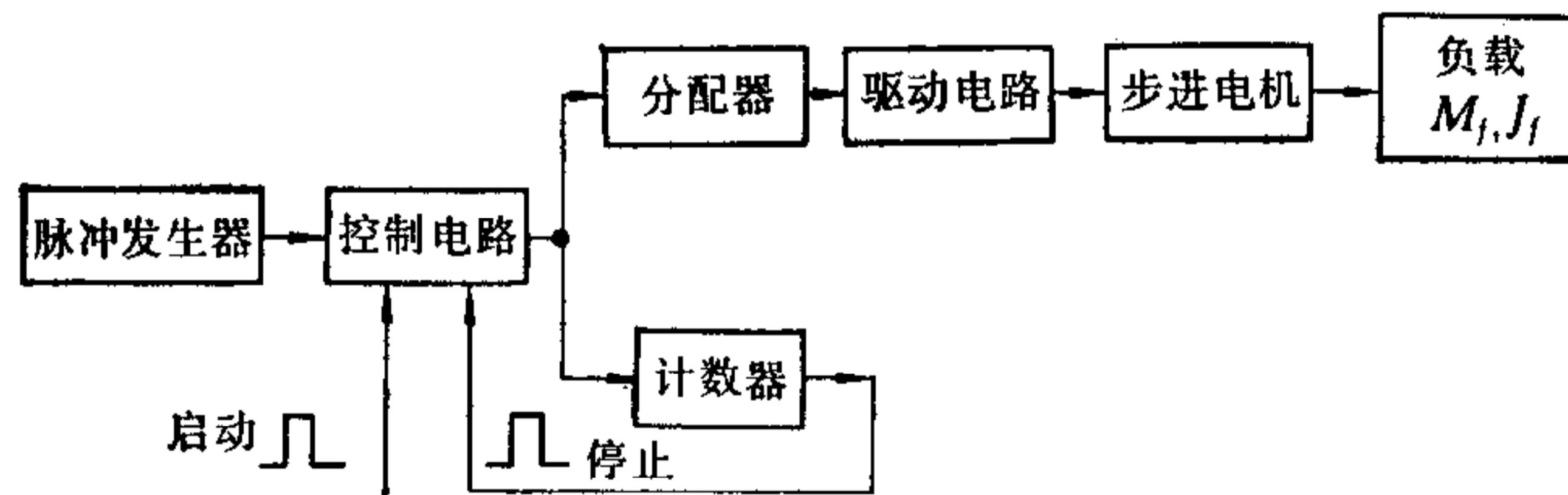


图1 开环控制步进电机框图

1. 步距和静态步距误差

步距是指步进电机的分配器在输入一个电脉冲时转子转过的角度,我国目前生产的步进电机步距为 $1.5^\circ/3^\circ$ 的较多。步距不仅和电机的转子齿数有关,也和步进机的相数及分配方式有关,如果齿数为40,三相三拍分配时:

$$\text{步距} = \frac{\text{齿数}}{\text{拍数}} = \frac{360^\circ/40}{3} = 3^\circ$$

三相六拍分配时:

$$\text{步距} = \frac{360^\circ/40}{6} = 1.5^\circ$$

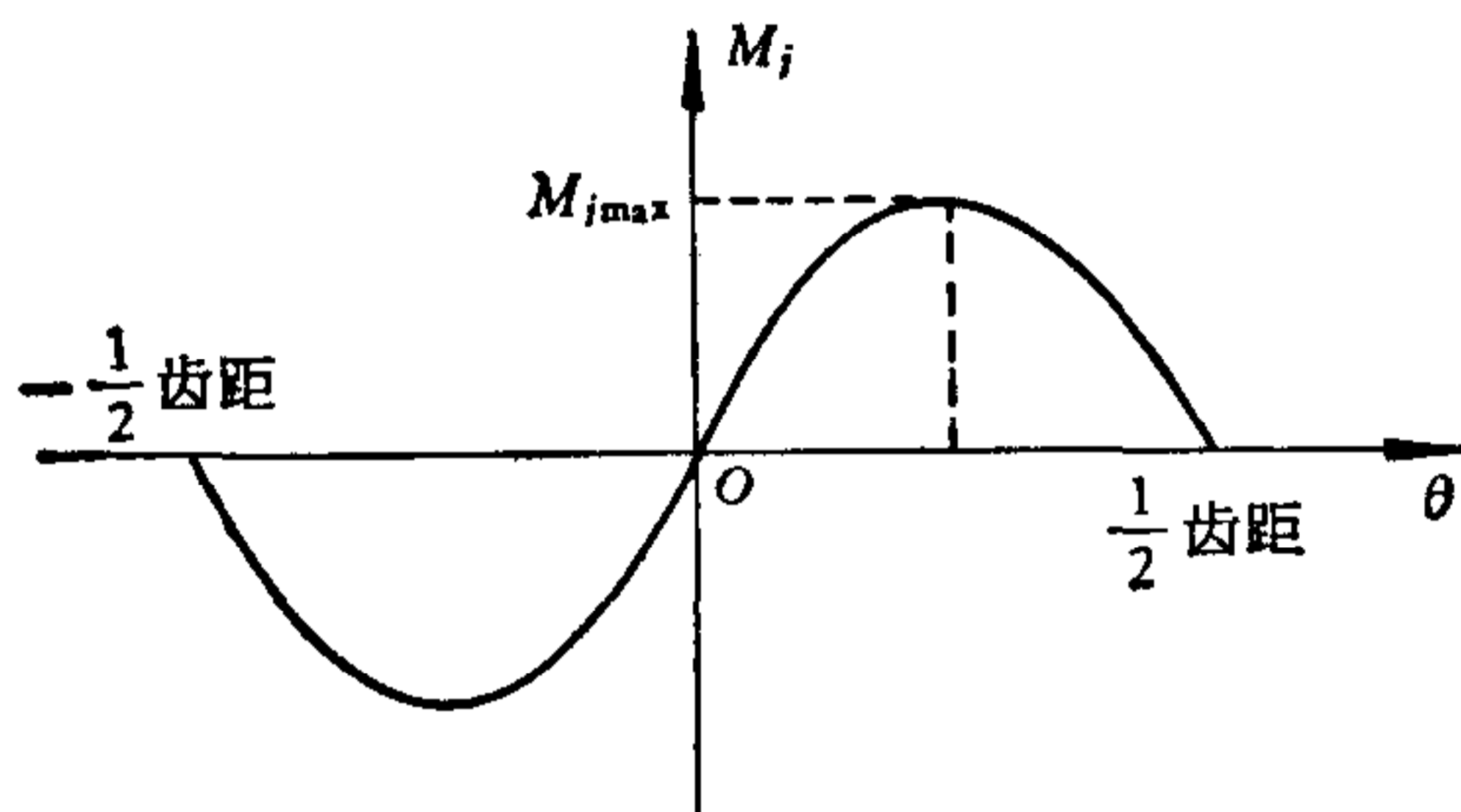
步进机在空载时,每输入一个脉冲给分配器,转过的步距值应该等于上述理论值,但

* 本文曾于1979年中国电子学会计算机年会上交流过,修改稿于1980年5月17日收到。

步距的实际值和理论值之间有偏差,这个偏差称为静态步距误差,一般为 10% 左右。

2. 静转矩和“矩角特性”:

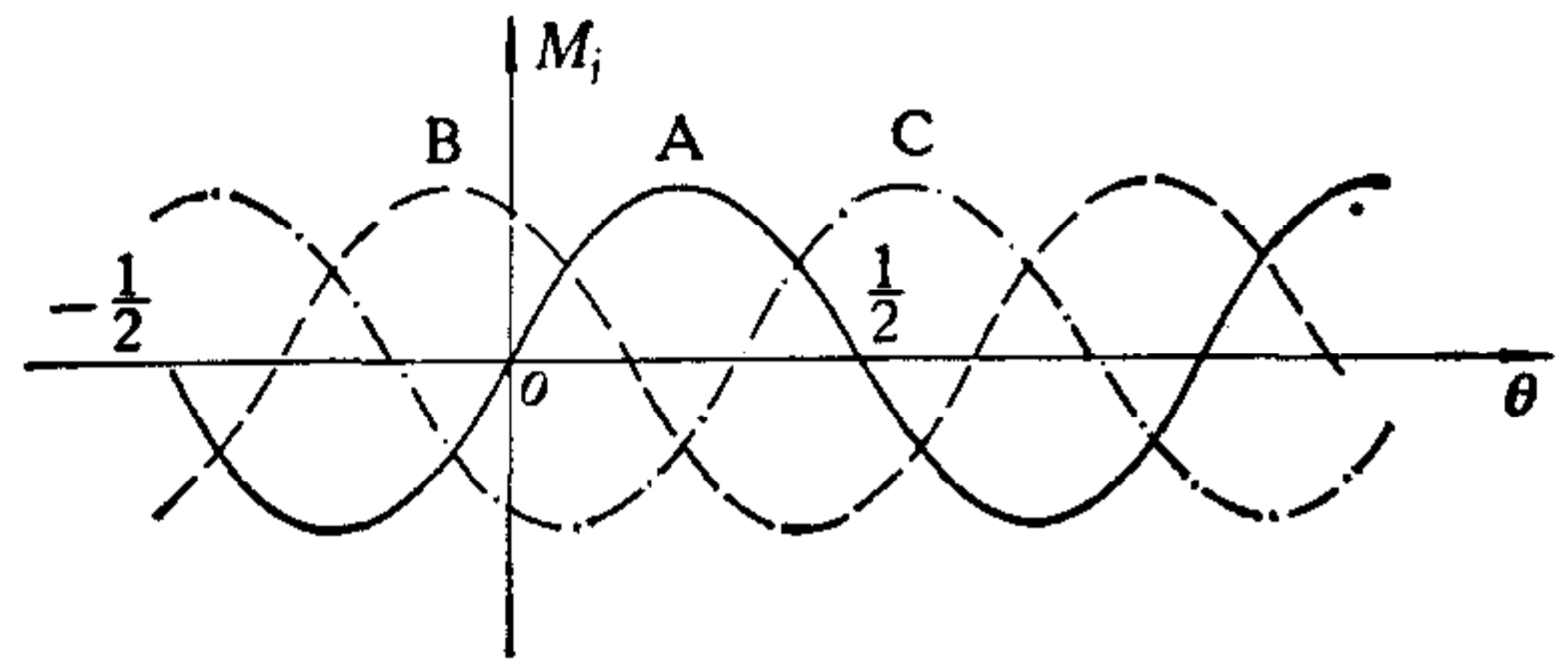
静转矩是指破坏了步进机平衡位置所产生的电磁转矩。例如电机 A 相绕组通电,转子齿和 A 相磁极对齐,这个位置称为步进机的初始稳定平衡位置,假如在转子轴上有外加转矩,这时转子齿就不能和 A 相磁极对齐,而是转过一个角度,则电机产生电磁转矩和外加转矩平衡,我们把偏离的角度称为失调角 θ 。由于失调角 θ 所产生的电磁转矩称为步进电机的静转矩 M_j 。步进电机静转矩 M_j 和失调角 θ 之间的关系称为步进电机的静态“矩角特性”,如图 2 所示。它近似于正弦曲线,当有很小失调角 θ 时,电磁转矩的方向是使失调角减小。



$$M_j \cong M_{jmax} \sin 40\theta$$

齿数为 40 时,齿距 $\theta = 9^\circ$

图 2 步进电机的“矩角特性”



$$M_A = M(i_A) \sin 40\theta \quad M_B = M(i_B) \sin(40\theta + 120^\circ)$$

$$M_C = M(i_C) \sin(40\theta - 120^\circ)$$

图 3 三相步进电机的静态“矩角特性”

由于步进电机的静转矩是随失调角 θ 而变化,所以在步进电机的技术指标中给出的“最大静转矩”就是指图 2 中的 M_{jmax} 。

三相步进电机的静态矩角特性如图 3 所示, A、B、C 是顺序通电的,因此转子在不同角度下受到不同的电磁转矩。可以看出:

1) 当步进电机轴上有固有的负载转矩 M_l 时,静态就不能处于初始稳定平衡位置而是转过一个失调角 θ ,产生电磁力矩 M_j 与负载力矩 M_l 平衡,当步进电机用于数字控制时,这个失调角就会造成误差。

2) 由矩角特性曲线可以看出,若失调角超过一定范围时 ($\pm \frac{1}{2}$ 齿距),就会产生相反方向的电磁转矩,因此失调,少一个齿距或多一个齿距,造成转子运行中的“丢步”或“多步”现象,且“丢步”或“多步”的步数在三拍运行时是 3 的倍数,在六拍运行时是 6 的倍数。

3) 在步进电机带有负载力矩 M_l 连续运行时,或步进电机启动、制动时,为了产生转矩必须有失调角。

3. 矩频特性:

步进电机的矩频特性是指加入分配器的脉冲频率与电机产生转矩的平均值之间的关系,了解这个关系对使用步进电机很重要。从矩角特性知道,转子在不同位置时,电机产生的转矩大小是不同的。又由于电机绕组有电感,阻碍着绕组中电流的上升和下降,使转矩减少,因此我们讨论的矩频特性是一种综合效果,是在一定的电源电压值、电流波形、通电方式及负载惯性下测量的。BF 255075 电机的启动矩频特性如表 1。表 1 是在电源电

压 20 V、六拍方式、轴上附加负载惯量不大于 $4 \times 10^{-6} \text{ kg-CM-sec}^2$ 的情况下测量的, 随着频率增加, 启动转矩减少. 而连续矩频特性如表 2, 是由升频电路升到较高频率后测出的转矩, 因不需要对惯量再加速, 因此比启动转矩大.

表 1. BF 255075 电机的启动矩频特性

f (HZ)	0—100	100—170	170—230	230—600	600—700
M (g-cm)	2500	2000	1200	2000	1700
f (HZ)	700—800	800—900	1000—1200	1200—1400	1400—1600
M (g-cm)	1500	1350	1300	1200	1000
f (HZ)	1600—1700	1700—1800	1800—1900	1900—2000	
M (g-cm)	900	750	600	500	

注 双三拍时频率减半

表 2. BF 255075 电机的连续矩频特性

f (HZ)	1900	4000
M (g-cm)	1600	700

注 双三拍时频率减半

4. 影响步进电机快速性的因素

步进电机启动时转子要从静止状态很快加速, 当加入“突跳”的启动频率时, 电机的电磁转矩 M 除了要克服负载转矩 M_f (包括摩擦转矩) 之外, 还要产生加速度, 如方程(1)所表示的:

$$M - M_f = (J + J_f) \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

其中 $\frac{d\omega}{dt}$ 是转子的角加速度, J 是电机惯量, J_f 是负载惯量. 可以看出: M_f 大或 J 、 J_f 大, 都会使角加速度 $\frac{d\omega}{dt}$ 减小. 如果启动脉冲频率较高, 转子在最初一些节拍下未能转过完整的步距角, 当落后的角度超过一定范围时, 电机产生的电磁转矩相反, 步进电机就不能启动或“丢步”. 步进电机尤其对惯量很敏感, 惯量大, 启动时易“丢步”, 停止时易“过冲”, 这成为控制步进电机的重要问题, 使得提高“突跳”的启动频率很困难. 以往采用的方法是用自动升降频的脉冲源, 使脉冲频率开始时较低, 步进电机能不“丢步”地启动, 然后逐渐自动升高到较高的连续运行频率. 同理, 在要求停止转动时, 为了防止“过冲”, 使频率逐渐下降到停止. 升频或降频时间为 0.1 秒到 1 秒左右, 升、降频的时间太短

仍然会“丢步”或“过冲”。对于要求每次工作时间小于 100 ms, 甚至小于 10 ms 的少步数情况, 一般的自动升、降频方法是没有用的, 因此要求快速启停控制, 即用最少的步数、最短的时间将步进电机启动到最高的运行频率(超过“突跳”的启动频率), 在较高的运行频率下用最少的步数、最短的时间将电机停止。自动升降频的方法中, 升降频时间所以较长的原因, 是没有考虑在启动过程中如何使电机的启动转矩最大的问题(在停止过程中如何使电机的制动转矩最大), 只是为了防止“丢步”(“过冲”)使频率缓慢上升(下降), 因此, 我们有必要找到快速启停的理想脉冲规律。

分配器发出的换相信号是方波, 由于电机绕组有电感, 阻碍电流的上升或下降, 可用电路方程(2)表示:

$$E - Ri_j - L_j \frac{di_j}{dt} - \sum_{k=1}^n M_{jk} \frac{di_k}{dt} = 0 \quad (k \neq j) \quad (2)$$

对于三相步进电机 $j = 1, 2, 3$, $n = 3$, 式中的 R 为回路总电阻, 包括绕组电阻 R_j 和附加电阻 R_f , L_j 为绕组自感量, M_{jk} 为 j 、 k 绕组的互感量, E 为电源电压, 对不同的驱动电路以上参数是不同的。

因此, 影响快速运转(即连续运行频率高)的因素:

- 1) 负载转矩 M_f ;
- 2) 电机的电参数 L_j 、 M_{jk} 、 R_j 及额定电流 I_j ;
- 3) 驱动电路的形式及电源电压 E , 附加电阻 R_f 。

其中 2)、3) 两项总的效果影响相电流的波形, 从而影响电磁转矩的产生影响“快速启停”的因素:

- 1) 负载惯量 J_f , 电机转子惯量 J 及负载转矩 M_f ;
- 2) 电机的电参数 L_j 、 M_{jk} 、 R_j 及额定电流 I_j ;
- 3) 驱动电路的形式及电源电压 E , 附加电阻 R_f ;
- 4) 启停控制脉冲的规律。

二、步进电机的快速启停控制

什么样的脉冲规律加到分配器上, 能使步进电机经过最少的步数、最短的时间、不“丢步”地启动到较高的运行频率呢? 由(1)式我们知道, 应该使它在启动过程中总处于最大可能的力矩状况。由于加入步进电机驱动电路的是开关信号, 如果绕组的等效时间常数和相激励周期相比是小的(即相电流波形接近于方波, 这由下面的驱动电路保证), 电磁力矩 M 能直接由静态“矩角特性”(图 3) 计算¹⁾, 对于三相六拍的步进电机, 为了使它在启动时处于最大可能的转矩状况, 由图 4 可知, 应先加两个很近的脉冲, ($A \rightarrow AB \rightarrow B$), 使失调角 θ_B 为 $\frac{2/3 \times 180^\circ}{40}$, 产生电磁转矩 M_p , 使电机转子有加速度, 当电机一开始转动, 失调角减少一些, 在一个步中, 转矩在 $M_p \sim M_\theta$ 之间变化, 因此可以说基本上是处

1) 若绕组的等效时间常数不能忽略, 由于相电流的建立需要时间, 在相电流未达到额定值时, 其“矩角特性”比静态“矩角特性”低, 且是变化的, 电磁力矩 M 不能用“静态特性”计算, 其办法是要用动态方程组由计算机来解^[1]。

于最大可能转矩的情况,由于 M_p 到 M_θ 的值变化不大,因此接近于等加速运动.

$$\theta = \frac{1}{2} \varepsilon t^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{M - M_f}{J + J_f} \right) t^2$$

为使第三个脉冲到来,电机仍基本上处于最大的转矩状况,通过分析我们知道,应在转子走完一个步距 (1.5°) t_1^* 时加第三个电脉冲,即:

$$\frac{1}{2} \varepsilon (t_1^*)^2 = \theta_0 \quad (\theta_0 \text{ 为一个步距} = 1.5^\circ)$$

则
$$t_1^* = \sqrt{\frac{2\theta_0}{\varepsilon}}$$

同理第四个脉冲应加在转子走完 2 个步距的时间:

$$\frac{1}{2} \varepsilon (t_2^*)^2 = 2\theta_0$$

则
$$t_2^* = \sqrt{\frac{2(2\theta_0)}{\varepsilon}} = \sqrt{2} t_1^*$$

第五个脉冲应加在 $\sqrt{3} t_1^*$

第六个脉冲应加在 $\sqrt{4} t_1^*$

第 n 个脉冲应加在 $\sqrt{n-2} \times \sqrt{\frac{2\theta_0}{\varepsilon}}$ 时.

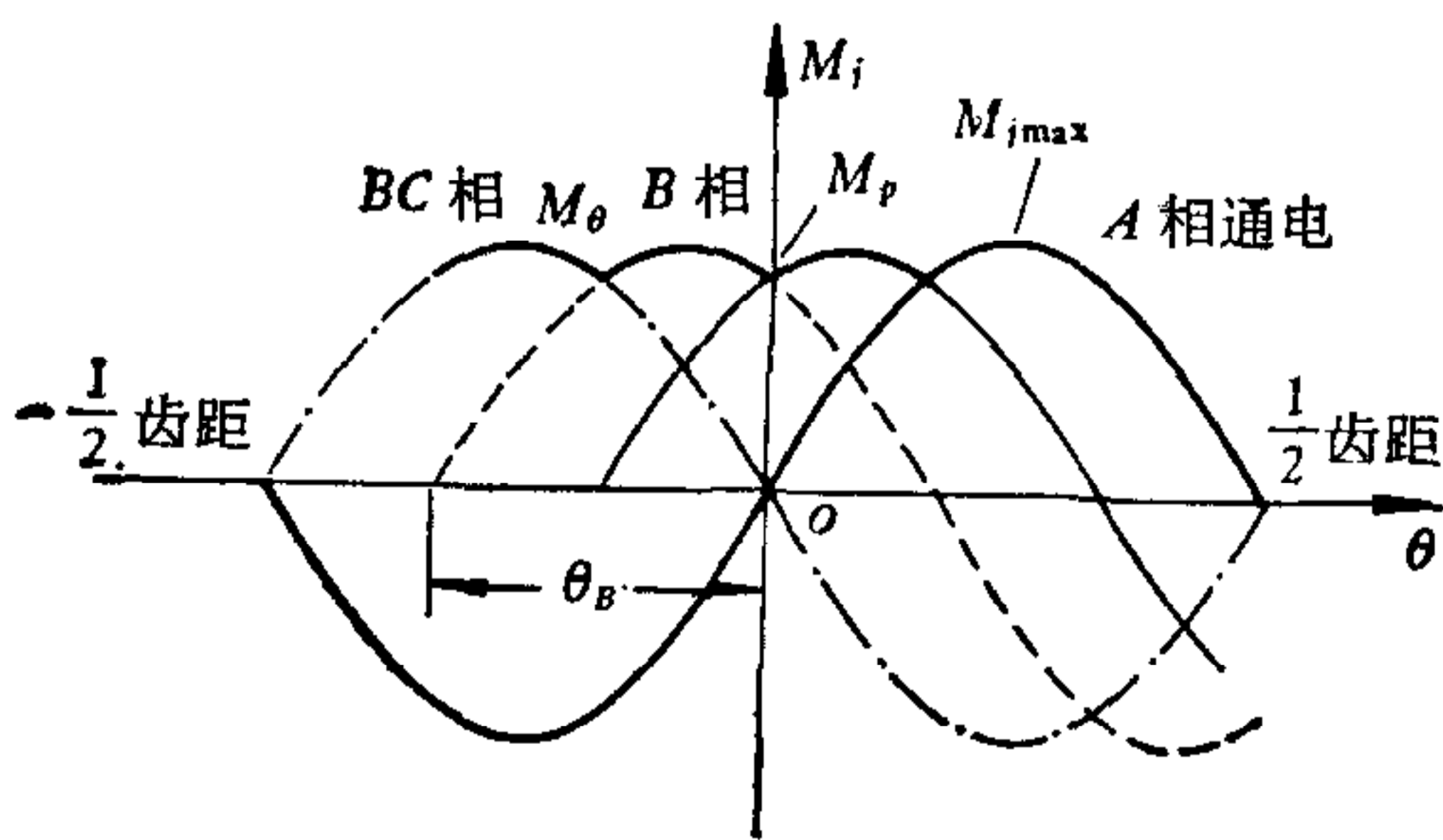


图 4 启动过程分析

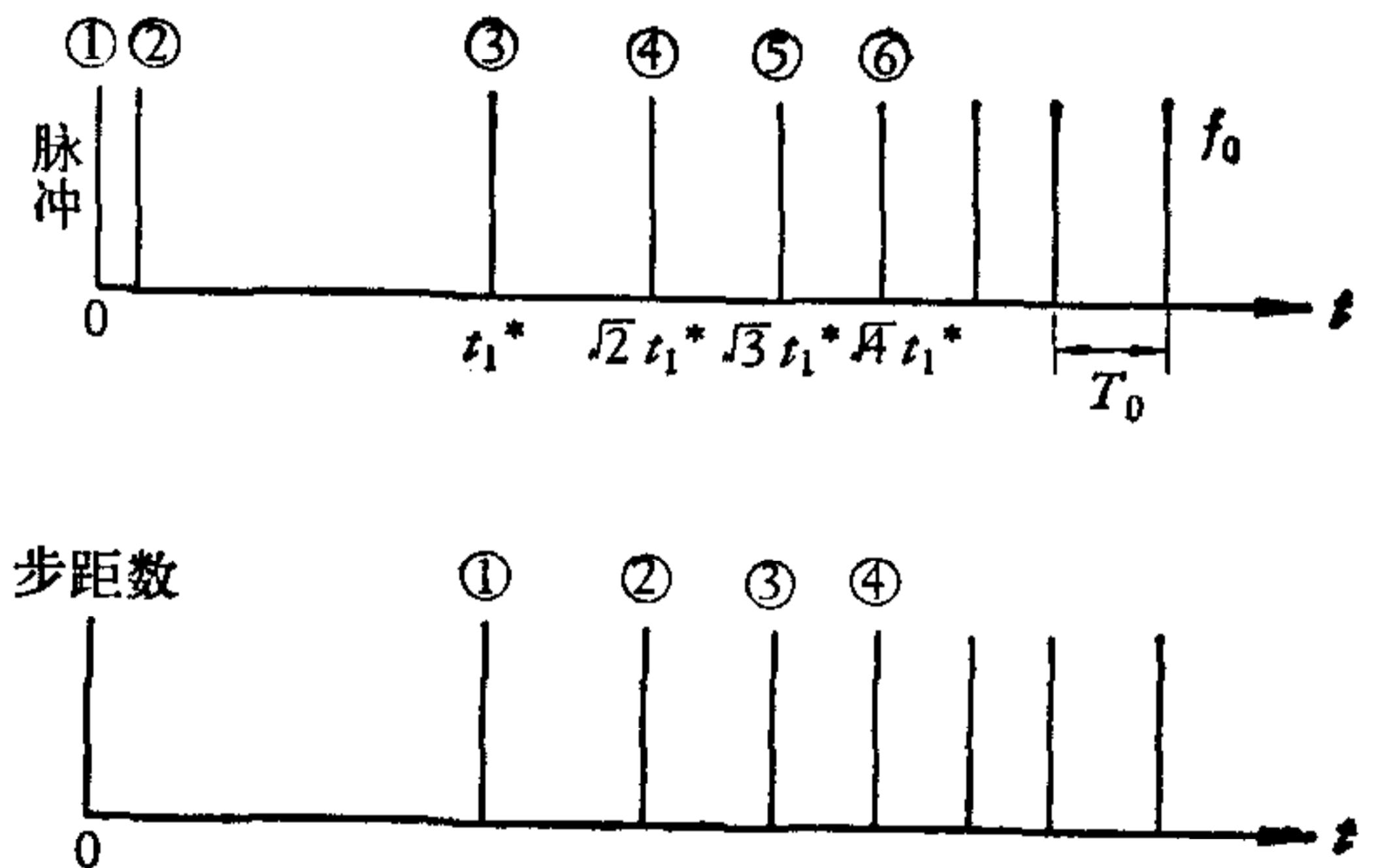


图 5 近似理想的启动脉冲规律

近似理想的启动脉冲规律如图 5 所示. 当启动的脉冲周期减小到接近所要求的电机运行周期 ($T_0 = \frac{1}{f_0}$) 时, 变成均匀脉冲. 当要求快速停止时, 首先少发一个脉冲, 靠惯量使失调角为负, 产生反方向的最大可能制动转矩, 使转子作等减速运动, 几个步距后就可以停止. 图 6 画出了“快速启停”理想控制脉冲规律的推导示意图^[2].

这种启动方式究竟需要几个脉冲过渡呢? 这与步进电机的参数、负载转矩 M_f 、负载惯量 J_f 及所要求达到的运行频率 f_0 有关. 例如: 步进电机 BF 255075 静态最大转矩是 5000 g-cm, 希望在电源电压 60 V 时快速启动到 $f_0 = 3300$ HZ, 求快速启动的脉冲规律.

因最大可能的转矩在 $M_p \sim M_\theta$ 之间变化, 即最大值为 M_{jmax} , 最小值为

$M_{jmax} \sin\left(\frac{2}{3}\pi\right) = 0.866 \times M_{jmax}$, 转子处于近似

等加速运动中, 转矩不能简单地取平均值. 为了留有余量, 估计时取最小值为 $0.866 \times M_{jmax}$, 若转子总惯量约为 0.2 g-cm-sec^2 , 则加速度为:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{M}{J + J_f} = \frac{M_{jmax} \times \sin\left(\frac{2}{3}\pi\right)}{J + J_f} \\ &= \frac{5000 \times 0.866}{0.2} \\ &= 21650 \text{ 弧度/秒}^2 = 1.23 \times 10^6 \text{ 度/秒}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} t_1^* &= \sqrt{\frac{2\theta_2}{\varepsilon}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.5 \text{ 度}}{1.23 \times 10^6 \text{ 度/秒}^2}} \\ &= 1.55 \text{ ms.} \end{aligned}$$

加第三个脉冲的时间在 1.55 ms.

第四、第三脉冲间的间隔 $(\sqrt{2} - 1) t_1^* = 0.635 \text{ ms}$

第五、第四脉冲间的间隔 $(\sqrt{3} - \sqrt{2}) t_1^* = 0.5 \text{ ms}$

第六、第五脉冲间的间隔 $(\sqrt{4} - \sqrt{3}) t_1^* = 0.41 \text{ ms}$

第七、第六脉冲间的间隔 $(\sqrt{5} - \sqrt{4}) t_1^* = 0.34 \text{ ms}$

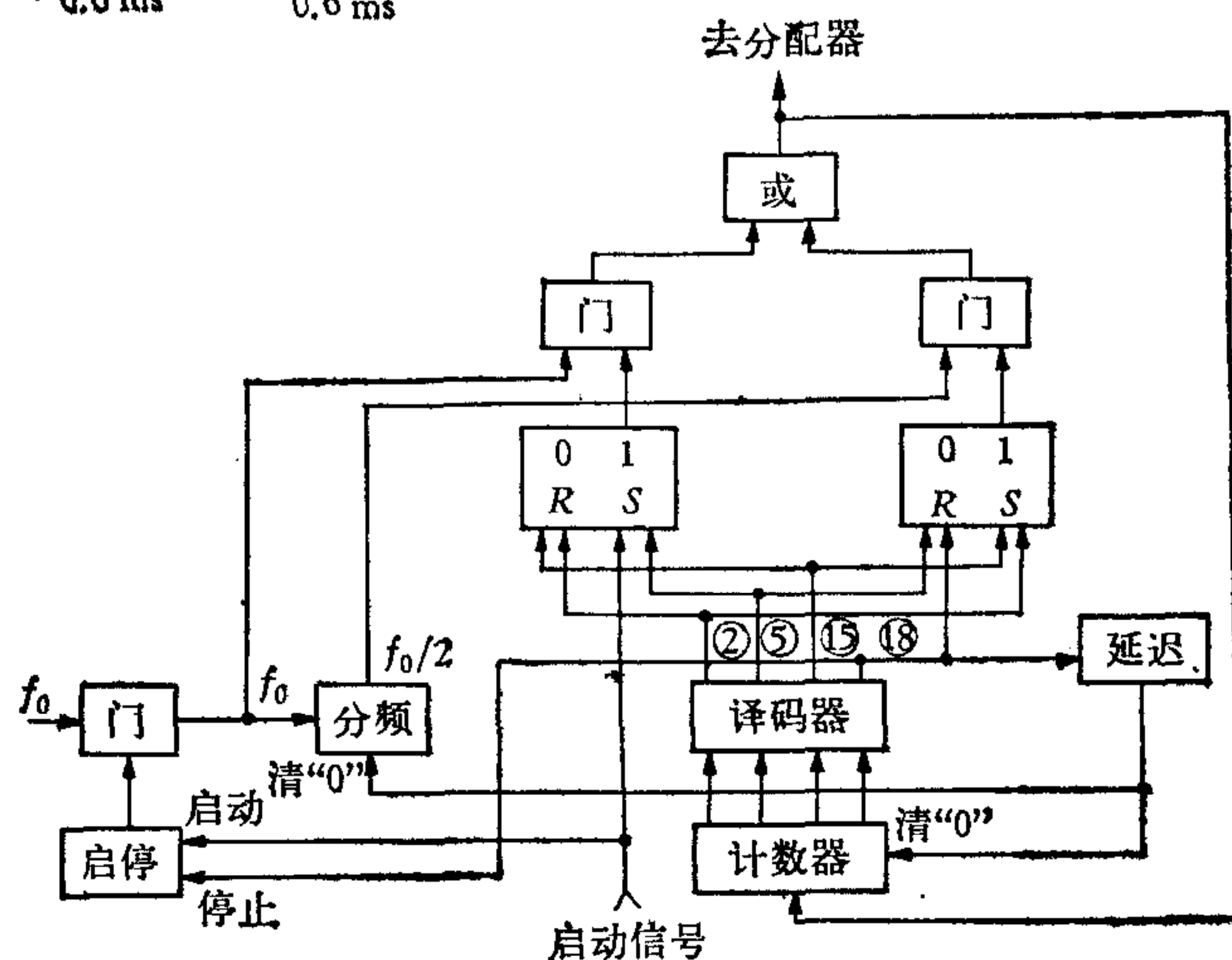
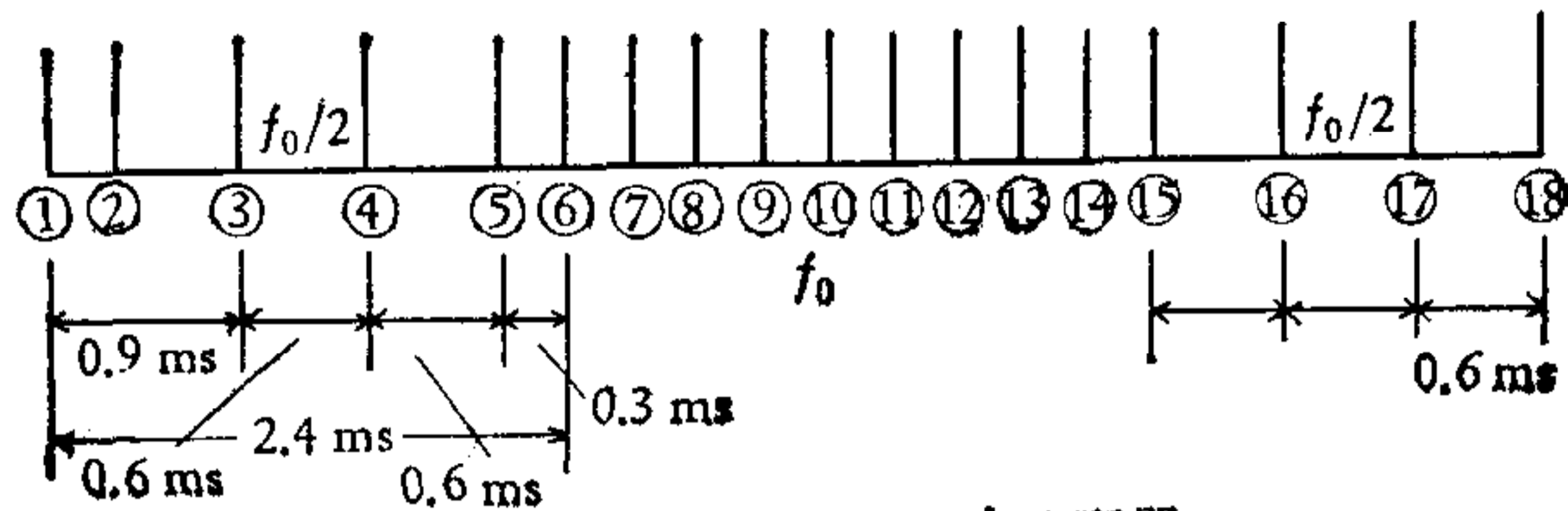


图 7 近似理想的“快速启停”控制脉冲产生框图

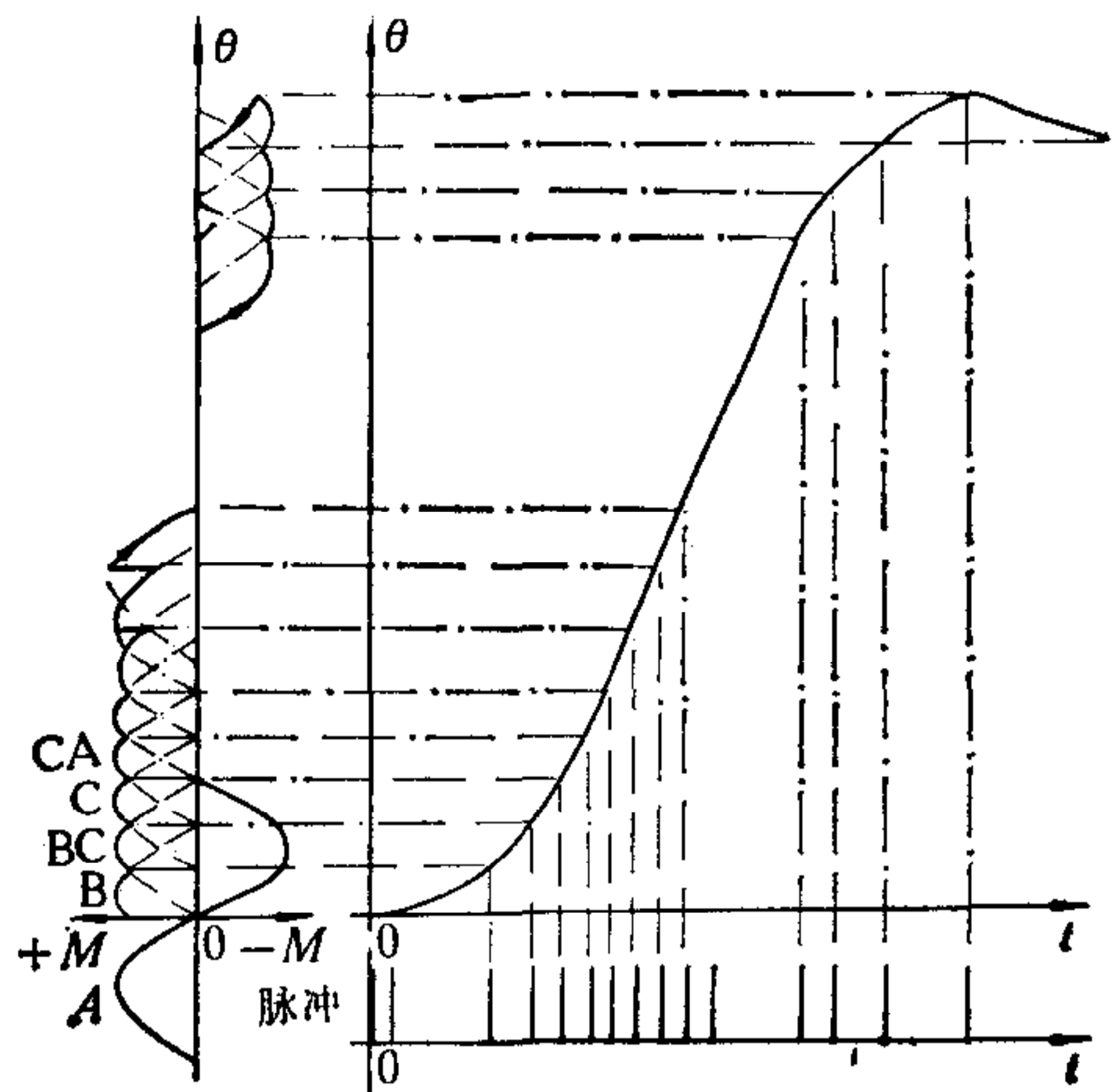


图 6 步进电机“快速启停”控制脉冲规律推导示意图

连续运行脉冲周期

$$T_0 = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{3300} = 0.3 \text{ ms.}$$

由此可看出用四、五个特殊规律的脉冲, 在 3~4 ms 内可完成启动. 实际中可以根据这个规律用简单的逻辑电路近似实现. 图 7 为总共只有 18 个脉冲的“快速启停”控制脉冲产生框图. 虽然图 7 的效果没有理想的脉冲规律效果好, 但比没有考虑最大转矩的情况要好. 可在 2—3 ms 达到 3300 Hz. 由于脉冲数太少, 图 7 线路实际工作在高速的时间太短.

此外, 当步进电机用于每次走很少步数的情况时, 了解

步进电机启动的过渡过程,恰当地选择步数,对快速启停有好处. 图 8 是当向分配器加“突跳”频率脉冲时,电机转动速度的过渡过程. 试验中发现: 在脉冲频率 f_0 、驱动电路、负载转矩、负载惯量都不变的情况下,只改变每次所走的步数,对 BF 255075 电机,当要走 6 步或 8 步时最易“过冲”,走 12 步最好,走 18 步稍差一些. 这个现象用图 8 容易说明,由于步进电机走的步数很少,启动后还未达到稳态就又要停止,过渡过程是一个衰减振荡,有时速度高,有时速度低,造成了某些步数很易“过冲”,这是设计中应尽量避免的. 相反,我们也可以利用这个特点,即实现电脉冲频率“阶梯变化”的快速启停控制. 对于三相电机,先加启动频率 f_1 ,在第六步时再加“突跳”频率到 f_2 ,可以在较短的时间内把电机启动到较高频率(约为启动频率的 1.7 倍),如图 9 所示. 其控制也是用较简单的逻辑电路实现.

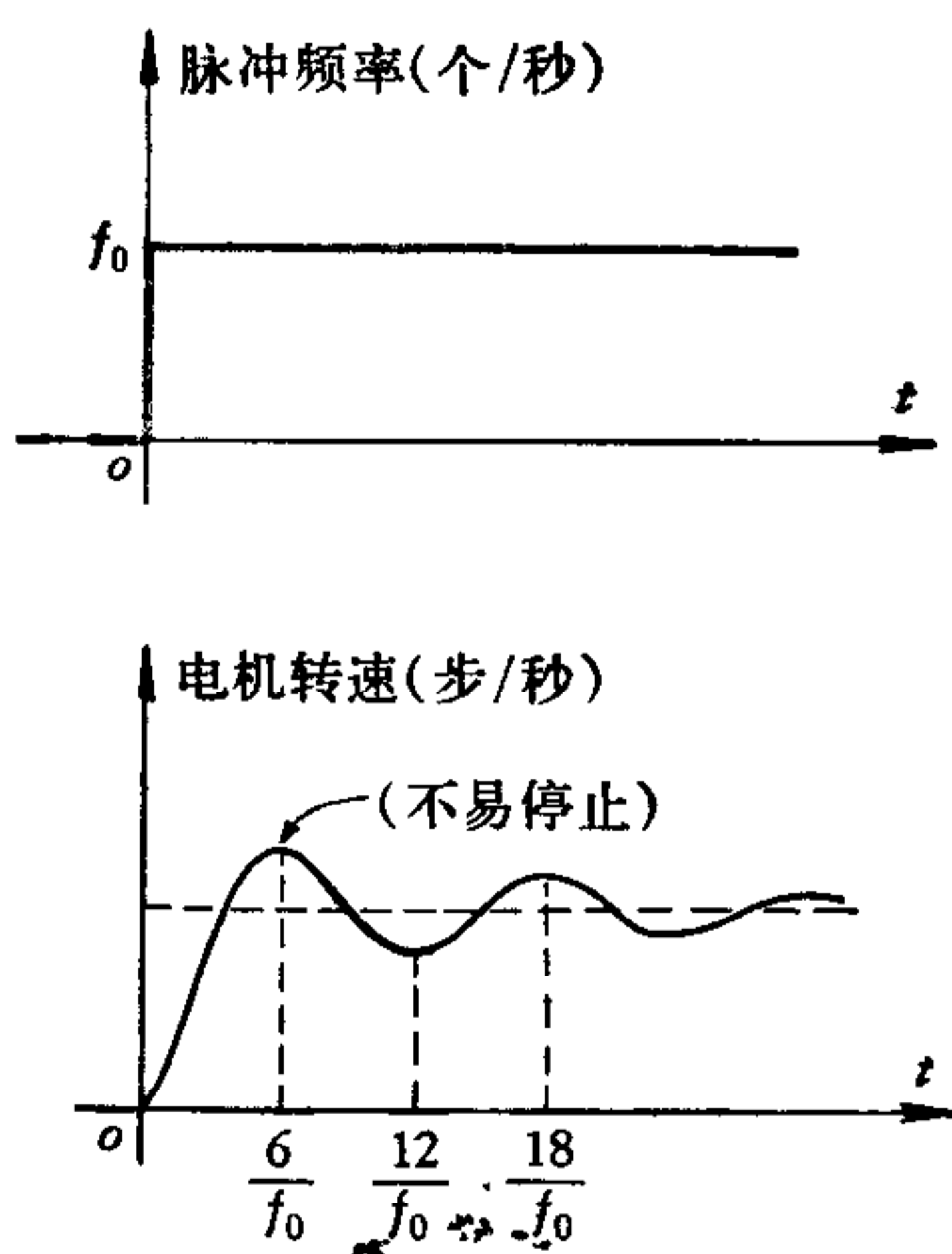


图 8 “突跳”频率脉冲作用下步进电机启动的过渡过程

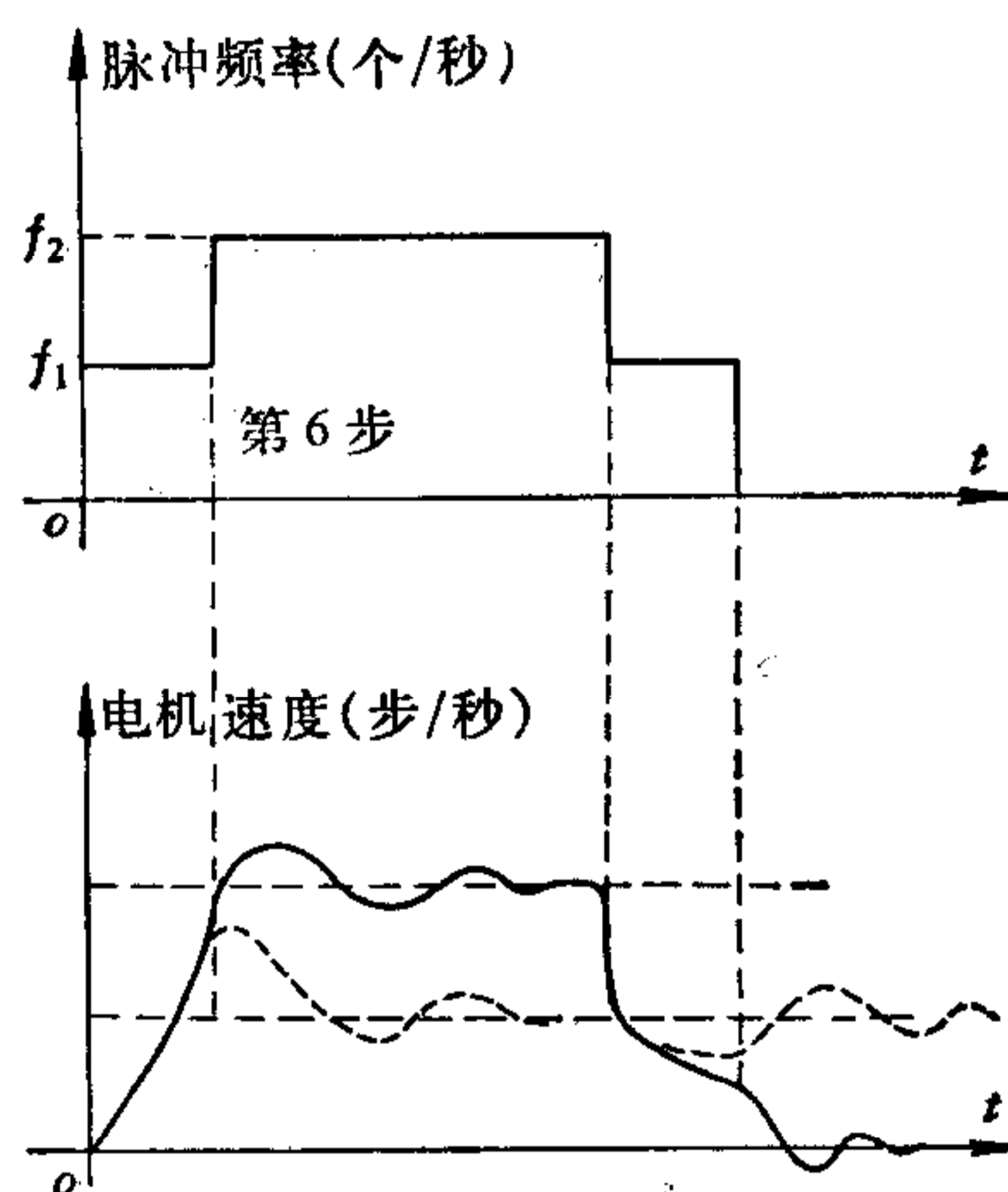


图 9 “阶梯启停”的示意图

三、步进电机的驱动电路

由于步进电机的绕组有较大的电感量,阻碍相电流的上升和下降,且当管子关闭时产生反电势加到管子的 c 、 e 端,这些是设计电机驱动电路应注意的问题.

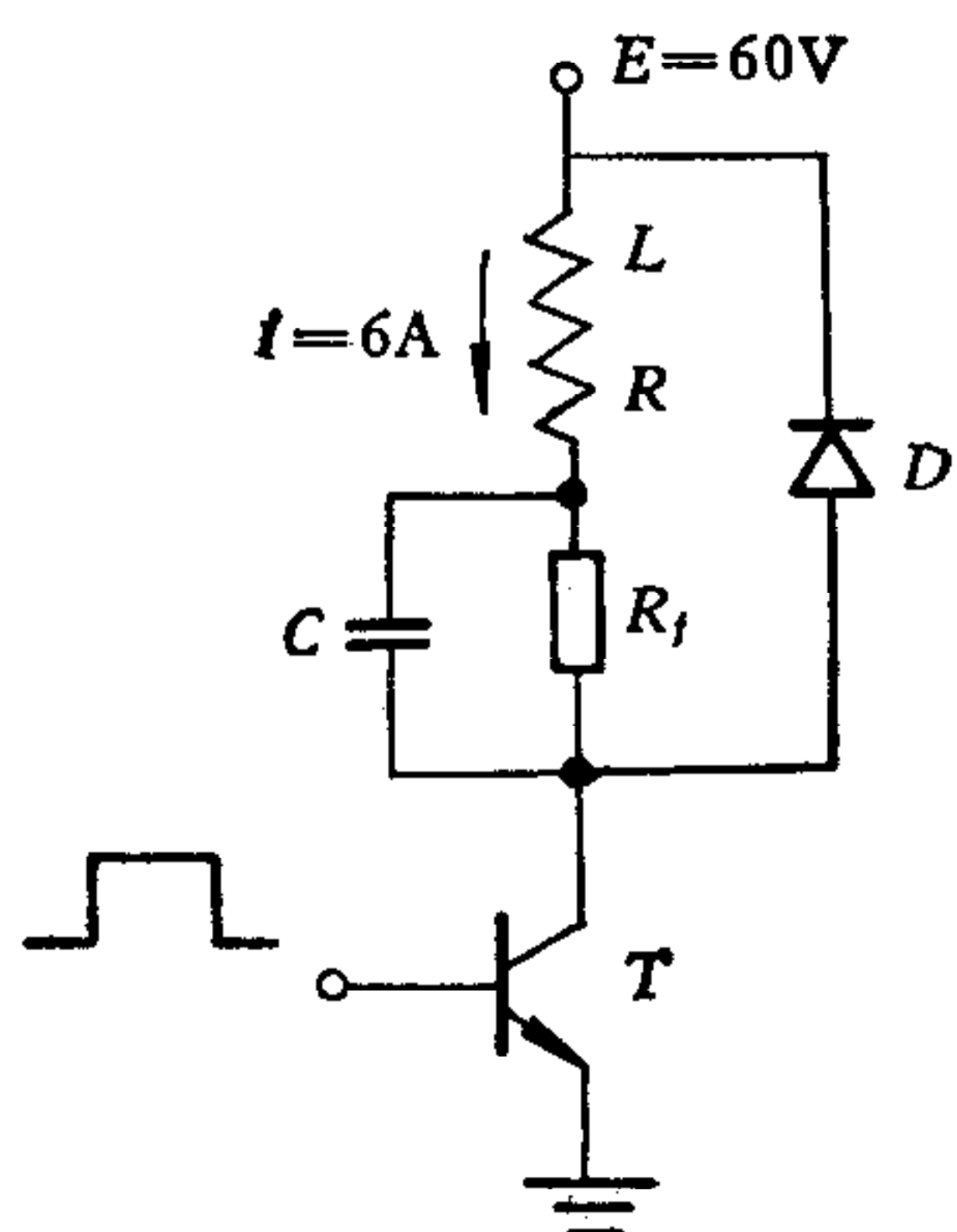


图 10 步进电机阻容驱动电路

使电流上升快的方法之一是降低回路的时间常数,即串入附加电阻 R_f ,以及加高电源电压 E ,如图 10 所示. 这个方案的最大缺点是附加电阻 R_f 上消耗电能大,变成热.

为了克服上述缺点,采用高低压切换的驱动电路,如图 11 所示. 在很短的时间内加高压 $E_{高}$,当相电流上升到接近额定电流时,马上把电源电压降低由 $E_{低}$ 供电. 回路里串入的电阻 R_0 是很小的,因此消耗电能少. 虽然 R_0 小,回路的时间常数要大些,但在窄脉冲期间内(几百微秒到 1 毫秒),60V 高压加在绕组和电阻 R_0 上,电流上升速度很快, $\tau_{上} = \frac{L}{R + R_0}$

$$= \frac{2.5 \text{ mH}}{0.3 \Omega + 1.2 \Omega} = 1.66 \text{ ms}, \text{ 因 } \frac{E_{\text{高}}}{E_{\text{低}}} = 5, \text{ 电流上升到额定值的时间 } t_{\text{上}} = \frac{\tau_{\text{上}}}{5} = 0.33 \text{ ms}.$$

上升的等效时间常数 $\tau'_{\text{上}} = \frac{1}{3} t_{\text{上}} = 0.11 \text{ ms}$, 见图 11(c).

要提高电机的启动频率和连续运行频率, 不仅要求电流波形的前沿陡, 而且要求后沿陡, 后沿拖的太长, 相当是个阻力矩. 图 11(a) 中续流二极管 D_2 有两种不同的接法 ①和 ②, 影响电流波形的后沿和管子 T_4 所承受的反压. ②接法有更多的优点:

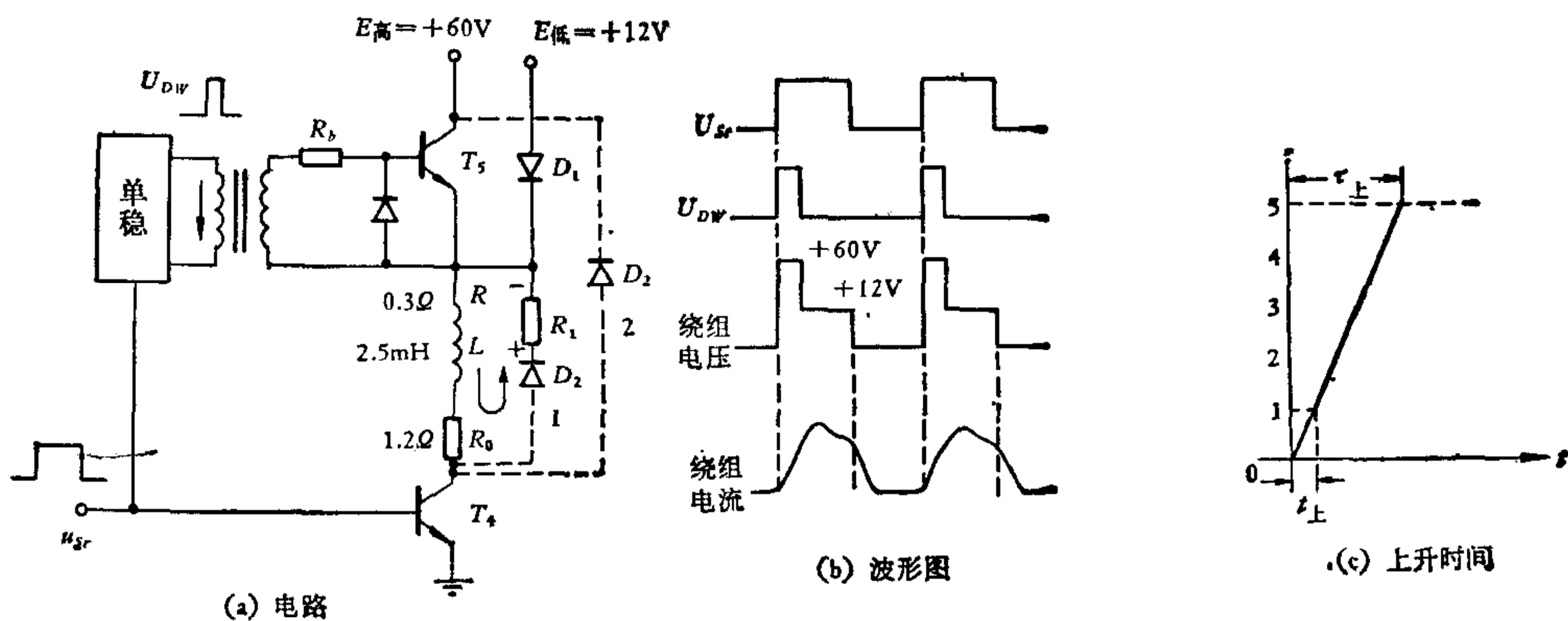


图 11 步进电机高低压切换的驱动电路及波形

1. 续流时间(相电流波形的后沿)的比较:

①接法是用续流二极管 D_2 和电阻 R_1 , 其续流时间

$$t_{\text{下}} \approx 3 \frac{L}{R + R_0 + R_1} = 3 \frac{2.5 \text{ mH}}{(0.3 + 1.2 + 20) \Omega} = 0.35 \text{ ms}$$

绕组的电磁能量在断电时消耗在电阻上.

②接法是用续流二极管 D_2 直接接到高压电源 $E_{\text{高}}$ 上, 续流时间常数

$$\tau_{\text{下}} = \frac{L}{R + R_0} = \frac{2.5 \text{ mH}}{(0.3 + 1.2) \Omega} = 1.66 \text{ ms}$$

虽然时间常数比①接法大, 但由于 D_2 接到 $+E_{\text{高}}$, 续流的趋向是负值, 如图 12 所示. 实际上, 因 D_2 的存在, 当 $i=0$ 时续流即结束. 这样, 续流时间 $t_{\text{下}}$ 的计算如下:

$$\begin{aligned} I_0 &= 6 \text{ A}, \\ I_{\infty} &= \frac{E_{\text{低}} - E_{\text{高}}}{R + R_0} = \frac{(12 - 60) \text{ V}}{(0.3 + 1.2) \Omega} \\ &= -32 \text{ A} \text{ (忽视二极管 } D_2 \text{ 上的压降)}, \end{aligned}$$

电流下降的规律为

$$i = (I_0 - I_{\infty}) e^{-\frac{t_{\text{下}}}{\tau_{\text{下}}}} + I_{\infty} = (6 + 32) e^{-\frac{t_{\text{下}}}{1.66}} - 32$$

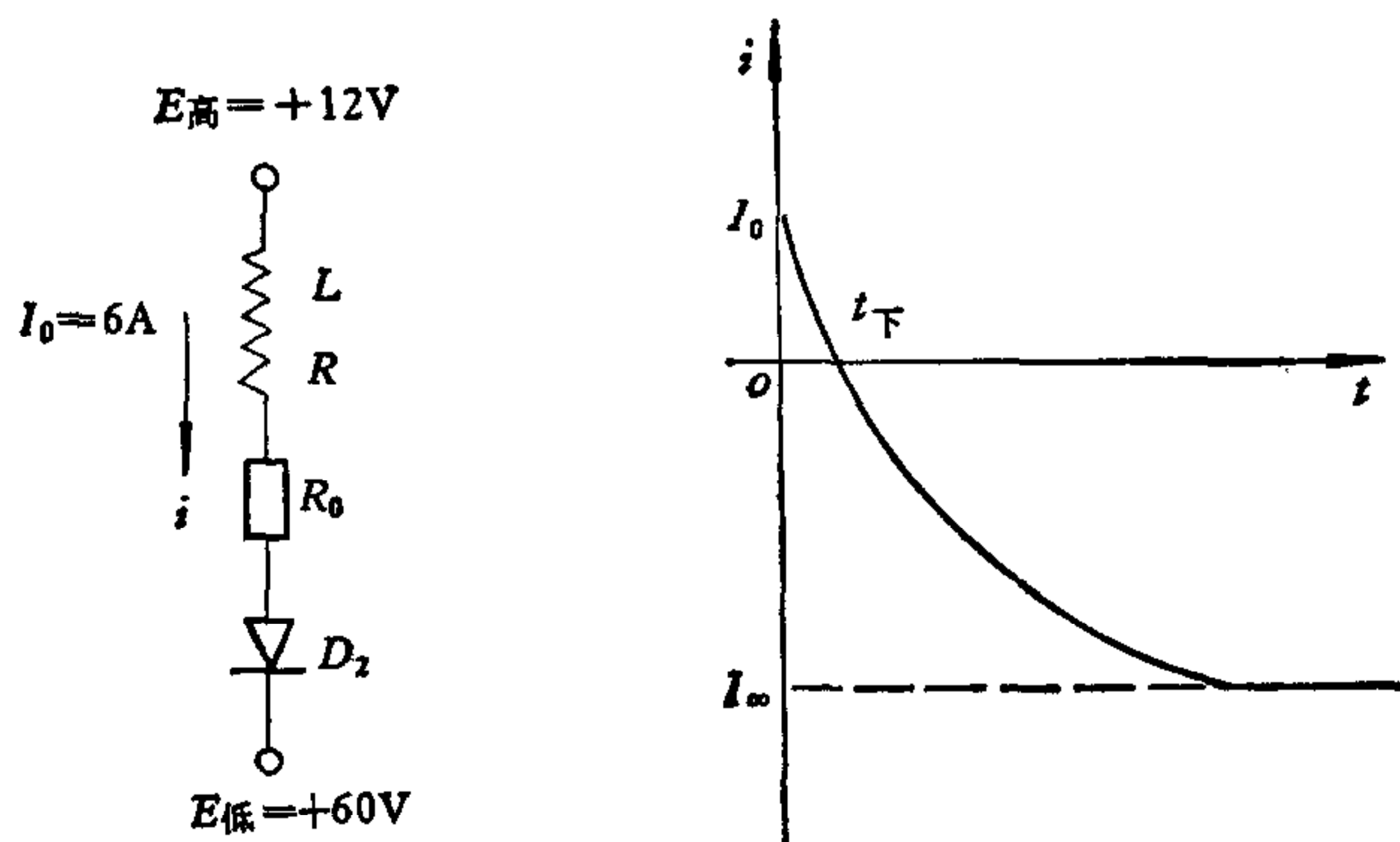


图 12 续流电路和过渡过程

当 $i = 0$ 时, 求出 $t_{\text{下}}$

$$e^{-\frac{t_{\text{下}}}{1.66}} = \frac{32}{38} = 0.842$$

$$t_{\text{下}} = 0.28 \text{ ms}$$

显然比①接法的 $t_{\text{下}}$ 要小.

2. T_4 管所承受的最大反压比较

①接法 $(V_{ce4})_{\text{max}} = E_{\text{低}} + I_0 R_1 = 12 + (6 \times 20) = 132 \text{ V}$ (在 D_1 还导通时)并随 R_1 的增加而增加. 若使 R_1 减少, 续流时间要延长.

②接法 $(V_{ce4})_{\text{max}} = E_{\text{高}} = +60 \text{ V}$

3. 消耗能量的比较

②接法将绕组的磁能变为电能, 大部分又送回电源 $E_{\text{高}}$, 而①接法则消耗在电阻 R_1 上.

参 考 文 献

- [1] Jacob, TAL, Step Motor Control for Maximum Torque, *IEEE Transaction on Automatic Control*, AC-21, (1976), 2, 224—227.
- [2] 黄凯日, 步进电机高低压驱动续流二极管的接法试验, 微特电机, (1978), 1, 55.
- [3] 陈理璧, 如何正确使用步进电机, 微特电机, (1978), 1, 65.
- [4] P. L. Lawrenson, A. Hughes and P. P. Acarnley, Improvement and Prediction of Open-loop Starting/Stopping Rates of Stepping Motors, *proc, IEE*. 124 (1977), 2, 169—172.

THE FAST CONTROL PROBLEM OF REACTIVE STEPPING MOTORS

XIA YING SUN CHENG-JIAN

(Department of Computer Science of Qinghua University)

ABSTRACT

Reactive Stepping Motor is an element converting the electrical pulses into angular displacement or linear displacement. It has been widely applied to digital control and computer control. It is desirable not only that the stepping motors can run at high speed, but also that the starting rate and stopping rate of stepping motors can be increased

Of course, the quality of the stepping motor itself plays an important role in the improvement of its speed, but the correct driving circuit and controlling method can produce a deep influence upon its performance and can help the motor to reach its possible highest performance. This paper deals with the factors which affect the operation of stepping motors and their starting or stopping rate, and the dynamic processes of starting and stopping. In this paper an ideal sequence of controlling pulses is derived to reach fast starting or stopping, and this is approximately implemented by simple logical circuits.