

# 第3章 数控机床电动机驱动系统

数控机床的控制电路是由各种不同的控制电气元件组成的，对进给伺服系统的控制性能在一定程度上决定了数控机床的等级。因此，在数控技术发展的过程中，电动机驱动系统的研制总是放在首要的位置。



## 3.1 电动机驱动系统的功能和要求

电动机驱动系统是数控装置和机床的联系环节，数控装置发出数控指令后，通过机床电动机驱动系统来驱动执行机构实现机床的精确进给运动，并转换成坐标轴的运动，完成程序所规定的操作。数控机床的电动机驱动系统是一种位置随动与定位系统，其作用是快速、准确地执行由数控装置发出的运动命令，精确地控制机床进给传动链的坐标运动。其性能的优劣决定了数控机床的精度和速度。所以从数控机床的角度来看，电动机驱动系统的作用主要包括两点：一是放大数控装置的控制信号，具有功率输出的能力；二是根据数控装置发出的控制信号对机床移动部件的位置和速度进行控制。

为确保数控机床进给系统的传动精度和工作平稳性等，对数控机床的进给传动系统提出的要求主要包括调速范围、定位精度、响应速度、转矩和稳定性等。

**【调速范围要宽】**与普通机床相比，数控机床的工艺范围更宽，工艺能力更强，因此要求其传动具有较宽的调速范围，以保证在加工时能选用合适的切削用量，从而获得最佳的加工质量和生产效率。现代数控机床的主运动广泛采用无级变速传动，用交流调速电动机或直流调速电动机驱动，能方便地实现无级变速，且传动链短、传动件少。调速范围是指进给电动机提供的最低转速和最高转速之比，在数控机床的应用中，由于加工用刀具、被加工材料、主轴转速以及零件加工工艺要求不同，为保证在任何情况下都能得到最佳切削条件，通常要求进给驱动系统的无级调速范围大于1:10 000，尤其在低速，如转速小于0.1r/min时，进给系统仍能平滑运动而无爬行现象。

**【定位精度要高】**定位精度是指数控机床要达到的某个坐标值和实际达到的位置之间的差距大小，或者是指零件或刀具等实际位置与标准位置（理论位置、理想位置）之间的差距，差距越小，说明精度越高。定位精度是零件加工精度得以保证的前提。

使用数控机床加工零件主要是为了保证加工质量的稳定性、一致性，减小废品率，解决复杂曲面零件的加工问题；解决复杂零件的加工精度问题，缩短制造周期等。数控机床按设定好的程序自动进行加工，可有效地避免操作者的人为误差。但是，数控机床不能像普通机床那样，可随时用手动操作来调整和补偿各种因素对加工精度的影响。因此，要求进给驱动系统具有较好的静态特性和较高的刚度，从而达到较高的定位精度，以保证机床具有较小的定位误差与重复定位误差。同时，电动机驱动系统还要具有较好的动态性能，以保证机床具有较高的轮廓跟随精度。

**【响应速度要快】**数控机床进给系统响应速度的大小不仅影响机床的加工效率，而且影

响加工精度。数控机床的快速响应特性是指进给系统对指令输入信号的响应速度及瞬态过程结束的迅速程度,即跟踪指令信号的响应要快;定位速度和轮廓切削进给速度要满足要求;工作台应能在规定的速度范围内灵敏而精确地跟踪指令,加工中心进行单步或连续移动,在运行时不出现丢步或多步现象。

数控系统在起动、制动时,要求加/减速的加速度足够大,以缩短进给系统的过渡时间,减小轮廓过渡误差。一般进给电动机的速度从零变到最高转速,或从最高转速降至零的时间在200ms以内,甚至小于几十毫秒,这就要求进给系统既要快速响应,又不能超调,否则将形成过切,影响加工质量。另一方面,当负载突变时,要求进给电动机速度的恢复时间也要短,且不能有振荡,这样才能得到光滑的加工表面。数控机床要求进给电动机必须具有较小的转动惯量和大的制动转矩、尽可能小的机电时间常数和起动电压。

**【过载能力强】**数控机床要求电动机驱动系统有非常宽的调速范围,例如在加工曲线和曲面时,拐角位置某轴的速度会逐渐降至零,这就要求进给驱动系统在低速时保持恒力矩输出,避免爬行,能够实现长时间的过载能力和频繁起动、反转、制动等能力。

**【稳定性好、寿命长】**稳定性是伺服进给系统能够正常工作的最基本的条件,特别是在低速进给情况下不产生爬行,并能适应外加负载的变化而不发生共振。稳定性与系统的惯性、刚性、阻尼及增益等都有关系,通过适当地选择各相关参数,使伺服系统达到最佳的工作性能,是电动机驱动系统设计的目标。所谓进给系统的寿命,主要是指保持数控机床传动精度和定位精度的时间长短,即数控机床各传动部件保持其原来制造精度的能力。为此,组成进给机构的各传动部件应选择合适的材料及合理的加工工艺与热处理方法,滚珠丝杠及传动齿轮必须具有一定的耐磨性,并采用适当的润滑方式,以延长其寿命。

**【使用维护方便】**数控机床属高精度自动控制机床,主要用于单件、中小批量、加工中心高精度及复杂的生产加工,机床的开机率相应较高,因而进给系统的结构设计应便于维护和保养,数控机床应最大限度地减少维修工作量,以提高机床的利用率。



## 3.2 电动机驱动系统的形式

电动机驱动系统主要由电动机驱动装置、电动机、传动机构和检测元件及反馈电路等部分组成。其中电动机驱动装置的主要作用是接收数控系统发出的指令,经过功率放大后,驱动电动机的转动。电动机转速的大小由数控指令来控制。电动机可以是步进电动机、直流伺服电动机,也可以是交流伺服电动机。采用步进电动机时,通常是开环控制。传动机构包括减速装置和滚珠丝杠等。若采用直线电动机作为执行元件,则传动机构与电动机是一体的。反馈电路包括速度反馈和位置反馈,检测元件有旋转变压器、光电编码器、光栅等。

电动机驱动系统包括开环控制和闭环控制两类,开环控制与闭环控制的主要区别为是否采用了位置和速度检测反馈元件组成反馈系统。

开环电动机驱动系统中没有测量装置。数控装置根据程序所要求的进给速度、方向和位移量输出一定频率和数量的进给指令脉冲,经驱动电路放大后,每一个进给指令脉冲驱动功率步进电动机旋转一个步距角,经减速齿轮、丝杠螺母副转化成工作台的当量直线位移。开环控制一般采用步进电动机作为驱动元件,如图3-1所示。由于它没有位置和速度反馈控

制回路,这简化了线路,设备投资低,调试维修都很方便,但它的进给速度和精度都较低,一般应用于经济型数控机床及普通的机床改造。

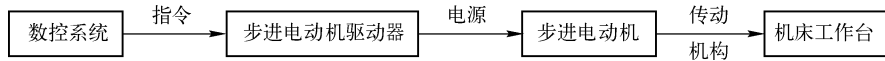


图 3-1 开环控制的步进电动机驱动系统

闭环电动机驱动系统一般采用伺服电动机作为驱动元件,其结构如图 3-2 所示。闭环方式直接从机床的移动部件上获取位置的实际移动值。数控装置将位移指令与位置检测装置(如光栅尺、直线感应同步器等)测得的实际位置反馈信号进行比较,根据其差值与指令进给位移的要求,按照一定的规律转换后,随时对驱动电动机的转速进行校正,使工作台的实际位移量与指令位移量一致,因此其检测精度不受机械传动精度的影响。因闭环环路包括了机械传动机构,它的闭环动态特性不仅与传动部件的刚性、惯性有关,而且还取决于阻尼、油的黏度、滑动面摩擦系数等因素。这些因素对动态特性的影响在不同条件下还会发生变化,这给位置闭环控制的调整和稳定带来了困难,导致调整闭环环路时必须降低位置增益,这又会对跟随误差与轮廓加工误差产生不利影响。所以采用闭环方式时必须增大机床的刚性,改善滑动面的摩擦特性,减小传动间隙,这样才有可能提高位置增益。闭环方式主要应用在精度要求较高的大型数控机床上。闭环进给伺服系统进给速度快、精度高,是数控机床的发展方向。



图 3-2 闭环控制的步进电动机驱动系统

半闭环控制一般将检测元件安装在伺服电动机的非输出轴端。伺服电动机角位移通过滚珠丝杠等机械传动机构转换为数控机床工作台的直线或角位移,其结构如图 3-3 所示。半闭环位置检测方式通过安装在电动机轴上的位置检测元件控制电动机的角位移,然后通过滚珠丝杠等传动机构,将电动机的角位移转换为工作台的直线位移。传动链上有规律的误差还可以由数控装置加以补偿,进一步提高精度,因此半闭环控制在精度要求适中的中、小型数控机床上得到了广泛的应用。半闭环方式的优点是它的闭环环路短,因而系统容易达到较高的位置增益,不发生振荡现象,它的快速性也好,动态精度高,传动机构的非线性因素对系统的影响小。但如果传动机构的误差过大或误差不确定,则数控系统难以补偿。由传动机构的扭曲变形所引起的弹性变形与负载力矩有关,故无法补偿。由制造与安装所引起的重复定位误差以及由于环境温度与丝杠温度的变化所引起的丝杠、螺距误差也不能补偿。

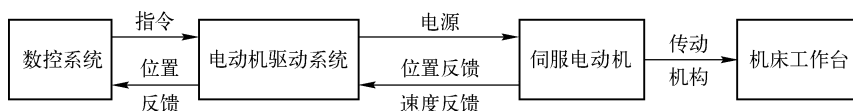


图 3-3 半闭环控制的步进电动机驱动系统

半闭环的电动机驱动系统的速度低于闭环数控机床，高于开环数控机床，由于机械制造水平的提高及速度检测元件和丝杠螺距精度的提高，半闭环数控机床已能达到相当高的进给精度。大多数的机床厂家采用了半闭环数控系统。

值得注意的是，用于速度反馈的检测元件（如编码器、光栅盘等）一般安装在电动机上，用于位置反馈的检测元件则根据闭环的方式不同而安装在电动机或机床上；在半闭环控制时速度反馈和位置反馈的检测元件一般共用电动机上的光电编码器，对于全闭环控制则分别采用各自独立的检测元件。



### 3.3 步进电动机伺服系统及其控制

正如 3.1 节所述，用步进电动机作为数控机床的进给驱动，一般采用开环的控制结构。数控系统发出的指令脉冲通过步进电动机驱动器，使步进电动机产生角位移，并通过齿轮和丝杠带动工作台移动。开环控制系统控制简单、价格低廉，但其精度低，可靠性和稳定性难以保证，所以通常只适用于经济型数控机床和机床改造。

#### 3.3.1 步进电动机的基本类型

比较常用的步进电动机包括反应式步进电动机（VR）、永磁式步进电动机（PM）、混合式步进电动机（HB）等几种。

反应式步进电动机的转子磁路由软磁材料制成，定子上有多相励磁绕组，利用磁导的变化产生转矩。该步进电动机一般为三相，可实现大转矩输出，步距角一般为  $1.5^\circ$ ，但振动和噪声比较大。永磁式步进电动机一般为两相，转矩和体积较小，步距角一般为  $7.5^\circ$  或  $15^\circ$ 。混合式步进电动机混合了永磁式和反应式的优点，它又分为两相和五相：两相步距角一般为  $1.8^\circ$ ，而五相步距角一般为  $0.72^\circ$ 。

反应式步进电动机和混合式步进电动机的结构虽然不同，但工作原理相同，并且反应式价格较低，所以反应式步进电动机是目前数控机床中应用最为广泛的一种。下面以反应式步进电动机为例，来分析说明步进电动机的工作原理。

如图 3-4 所示，在电动机定子上有 A、B、C 三对绕有线圈的磁极，分别称为 A 相、B 相和 C 相，而转子则是一个带齿的铁心，这种步进电动机称为三相步进电动机。当 A、B、C 三个磁极的线圈依次轮流通电时，A、B、C 三对磁极就依次轮流产生磁场吸引转子转动。设 A 相通电，则转子 1、3 两齿被磁极 A 吸住。A 相断电，B 相通电，则磁极 A 的磁场消失，而磁极 B 产生了磁场，磁极 B 的磁场把离它最近的 2、4 两齿吸引过去，这时转子逆时针转了  $30^\circ$ 。接下来，B 相断电，C 相通电，根据同样道理，转子又逆时针转了  $30^\circ$ 。若 A 相再次通电，C 相断开，那么转子再逆转  $30^\circ$ ，使磁极 A 的磁场把 2、4 两个齿吸住。定子各相轮流通电一次，转子转过一个齿。这样，按 A→B→C→A→B→C→A→… 次序轮流通电，步进电动机就一步一步地按逆时针方向旋转。通电线圈每转换一次，步进电动机旋转  $30^\circ$ 。如果把步进电动机通电线圈转换的次序倒过来，换成 A→C→B→A→C→B→… 的顺序，则步进电动机将按顺时针方向旋转，所以，要改变步进电动机的旋转方向，可以在任意相通电时进行。

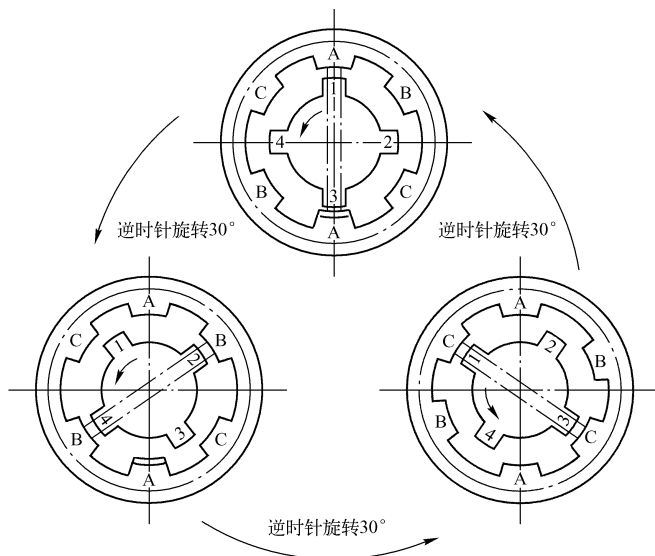


图 3-4 步进电动机工作原理

上述通电方式称为三相单三拍。“拍”是指从一种通电状态转变为另一种通电状态；“单”是指每次只有一相绕组通电；“三拍”是指一个循环中通电状态切换的次数是三次。

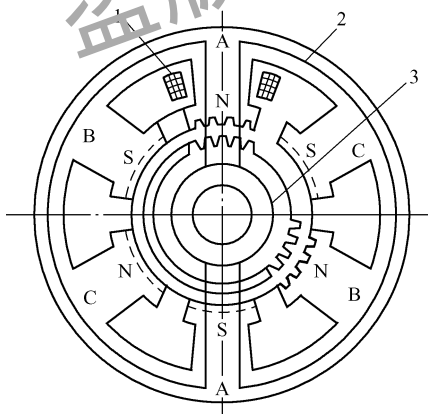
此外，还有一种三相六拍的通电方式，通电顺序为  $A \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A \dots$ 。若以三相六拍的通电方式工作，A 相断电而 A、B 相同时通电时，转子的齿将同时受到 A 相和 B 相绕组产生的磁场的共同吸引力，转子的齿只能停在 A 相和 B 相磁极间；A、B 相同时断电而 B 相通电时，转子上的齿沿顺时针方向转动，并与 B 相磁极齿对齐。这样，步进电动机转动一个齿距，需要六拍操作。

还有一种三相双三拍的通电方式，通电顺序为  $AB \rightarrow BC \rightarrow CA \rightarrow AB \dots$ 。因为它是两相同时通电，而每个循环只有三次通电，故称三相双三拍通电方式。在双三拍通电方式中，每次两相绕组同时通电，转子受到的感应力矩大，静态误差小，定位精度高。

通常，我们把步进电动机每步转过的角度（或定义为步进电动机每一拍执行一次步进，其转子所转过的角度）称为步距角。如果转子的齿数为  $Z$ ，步进电动机的工作拍数为  $K$ ，则步距角  $\beta$  为

$$\beta = \frac{360^\circ}{ZK}$$

步进电动机的步距角越小，它所能达到的位置精度越高，所以在实际应用中都采用小步距角，常采用图 3-5 所示的实际结构。电动机定子有三对六个磁极，每对磁极上有一个励磁绕组，每个磁极上均匀地开着五个齿槽，齿距角为  $9^\circ$ 。转子上没有线圈，沿着圆周均匀分布了 40 个齿槽，齿距角也为  $9^\circ$ 。定子和转子均由硅钢片叠成。定子片的三相磁极错开  $1/3$  的齿距。这就使 A 相定子的齿槽与转子齿槽对准，B 相定子齿槽与转子齿槽相错  $1/3$  齿距，C 相的定子齿槽与转子齿槽相错  $2/3$  齿距。这样才能在连续改变通电状态的条



1—绕组；2—定子铁心；3—转子铁心

图 3-5 定子与转子的磁极

件才能在连续改变通电状态的条

件下，获得连续不断的步进运动。

步进电动机转速计算公式为

$$n = \frac{\theta}{360^\circ} \times 60f = \frac{\theta f}{60^\circ}$$

式中， $n$  为转速， $f$  为控制脉冲频率， $\theta$  为步距角（单位为 $^\circ$ ）。

### 3.3.2 步进电动机位置控制系统

步进电动机位置控制系统可以是开环系统，也可以是闭环系统。但出于经济方面的考虑，步进电动机位置控制系统一般采用开环系统。

#### 1. 步进电动机位置控制系统的组成

在步进电动机位置控制系统中，位置指令一般是一串连续的脉冲。步进电动机绕组是按一定通电方式轮流工作的，为实现这种轮流通电，需将控制脉冲按规定的通电方式分配到电动机的每相绕组。这种分配既可以用硬件实现，也可以用软件实现。实现脉冲分配的硬件逻辑电路称为环形分配器。在计算机数字控制系统中，采用软件实现脉冲分配的方式称作软件环形分配。

经过环形分配器输出的进给脉冲式弱电信号功率很小，不能驱动步进电动机绕组，以产生足够的电磁转矩带动负载运动。所以，经过环形分配器输出的进给脉冲，需要进行功率放大，达到一定的电流和电压。一个完整的步进电动机位置控制系统构成如图 3-6 所示。

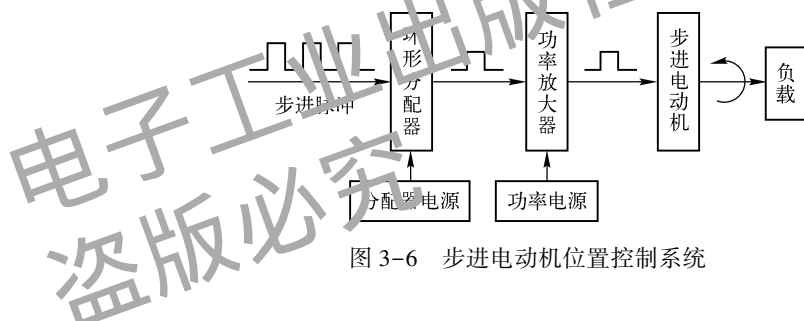


图 3-6 步进电动机位置控制系统

#### 2. 步进电动机的脉冲分配电路

1) 硬件脉冲分配器电路 步进电动机的脉冲分配可以由硬件或软件来实现。硬件环形分配器是根据步进电动机的相数以及通电方式而专门设计的电路，图 3-7 所示为一个三相六拍的环形分配器的逻辑电路图，其逻辑真值表如表 3-1 所示。

表 3-1 三相六拍环形分配器逻辑真值表

序 号	控制信号状态			输出状态			导电绕组
	CAJ	CBJ	CCJ	QA	QB	QC	
0	1	1	0	1	0	0	A
1	0	1	0	1	1	0	AB
2	0	1	1	0	1	0	B
3	0	0	1	0	1	1	BC
4	1	0	1	0	0	1	C
5	1	0	0	1	0	1	CA
6	1	1	0	1	0	0	A

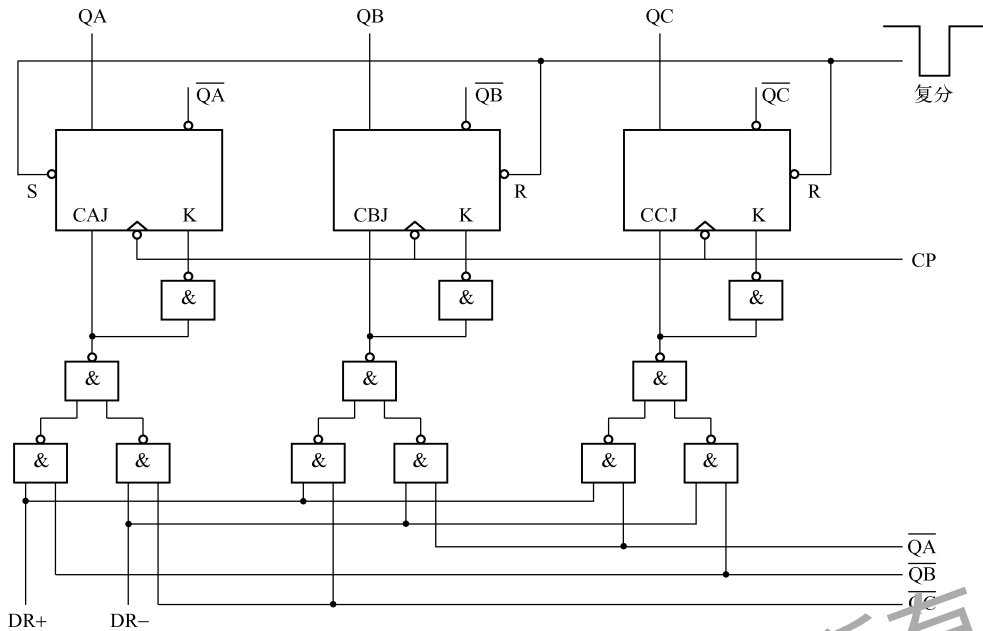


图 3-7 三相六拍环形分配器的逻辑电路图

分配器的主体是 3 个 J-K 触发器。3 个 J-K 触发器的 Q 输出端分别经各自的功放线路与步进电动机 A、B、C 三相绕组连接。当  $QA=1$  时，A 相绕组通电； $QB=1$  时，B 相绕组通电； $QC=1$  时，C 相绕组通电。DR+ 和 DR- 是步进电动机的正/反转控制信号。

正转时，各相通电顺序：A—AB—B—BC—C—CA；

反转时，各相通电顺序：A—AC—C—CB—B—BA。

2) 软件脉冲分配 对于不同的计算机和接口器件，软件环形分配有不同的形式，现以 AT89C51 单片机配置的系统为例加以说明。

(1) 对于由 P1 口作为驱动电路的接口，控制脉冲经 AT89C51 的并行 I/O 接口 P1 输出到步进电动机各相的功率放大器输入，设 P1 口的 P1.0 输出至 A 相，P1.1 输出至 B 相，P1.2 输出至 C 相。

(2) 建立环形分配表。为了使电动机按照上文所述顺序通电，首先必须在存储器中建立一个环形分配表，存储器各单元中存放对应绕组通电的顺序数值，如表 3-2 所示。当运行时，依次将环形分配表中的数据，也就是对应存储器单元的内容送到 P1 口，使 P1.0、P1.1、P1.2 依次送出有关信号，从而使电动机轮流通电。

表 3-2 所示为三相六拍环形分配表，K 为存储器单元基地址（十六位二进制数），后面所加的数为地址的索引值。要使电动机正转，只需依次输出表中各单元的内容即可。当输出状态已是表底状态时，则修改索引值使下次输出重新为表首状态。如要使电动机反转，则只需反向依次输出各单元的内容即可。当输出状态达到表首状态时，修改指针使下一次输出重新为表底状态。

表 3-2 三相六拍环形分配表

存储单元地址	单元内容	对应通电相
K+0	01H (0001)	A
K+1	03H (0011)	AB

续表

存储单元地址	单元内容	对应通电相
K+2	02H (0010)	B
K+3	06H (0110)	BC
K+4	04H (0100)	C
K+5	05H (0101)	CA

### 3.3.3 步进电动机驱动电路

步进电动机的驱动电路实际上是一种脉冲放大电路，使脉冲具有一定的功率驱动能力。由于功率放大器的输出直接驱动电动机绕组，因此功率放大电路的性能对步进电动机的运行性能影响很大。对驱动电路要求的核心问题则是如何提高步进电动机的快速性和平稳性。目前，国内经济型数控机床步进电动机驱动电路主要有以下几种：

#### 1. 单电压限流型驱动电路

图 3-8 所示是步进电动机单电压驱动电路，L 是电动机绕组，晶体管 VT 可以认为是一个无触点开关，它的理想工作状态应使电流流过绕组 L 的波形尽可能接近矩形波。但是由于电感线圈中的电流按指数规律上升，须经过一定的时间后才能达到稳态电流，又由于步进电动机绕组本身的电阻很小，所以时间常数很大，从而严重影响电动机的起动频率。为了减小时间常数，在励磁绕组中串接电阻 R，这样时间常数就会大大减小，缩短了绕组中电流上升的过渡过程，从而提高了工作效率。

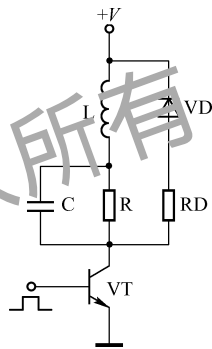


图 3-8 单电压驱动电路

在绕组 R 两端并联电容 C，是由于电容上的电压不能突变，在绕组由截止到导通的瞬间，电源电压全部降落在绕组上，使电流上升更快，所以电容 C 又称为加速电容。二极管 VD 在晶体管 VT 截止时起续流和保护作用，以防止晶体管截止瞬间绕组产生的反电势造成管子击穿，串联电阻 RD 使电流下降更快，从而使绕组电流波形后沿变陡。这种电路的缺点是 R 上有功率消耗。为了提高快速性，需加大电阻 R 的阻值，随着阻值的加大，电源电压也势必提高，功率消耗也进一步加大，正因为这样，单电压限流型驱动电路的使用受到了限制。

#### 2. 高/低压切换型驱动电路

高/低压切换型驱动电路的最后一级和电压、电流波形图如图 3-9 所示。这种电路中采用高压和低压两种电压供电，一般高压大于 60V，低压为 5~20V。 $U_1$  在 VT1 和 VT2 都截止时通过电源和  $U_2$  为电动机绕组提供放电回路。在  $t_1 \sim t_2$  时间内，VT1 和 VT2 均饱和导通，+80V 的高压电源经过 VT1 和 VT2 管加到步进电动机的绕组上，使其电流迅速上升，当时间到达  $t_2$ ，或电流上升到某一数值时， $U_{b2}$  变为低电平，VT2 截止，电动机绕组的电流由 +12V 电源经过 VT1 管来维持，此时，电流下降到电动机的额定电流，直到  $t_3$  时  $U_{b1}$  也为低电平，VT1 管截止，电动机绕组电流下降到 0。一般电压  $U_{b1}$  由脉冲分配经过几级放大获得，电压  $U_{b2}$  由单稳态电路再经脉冲变压器获得。