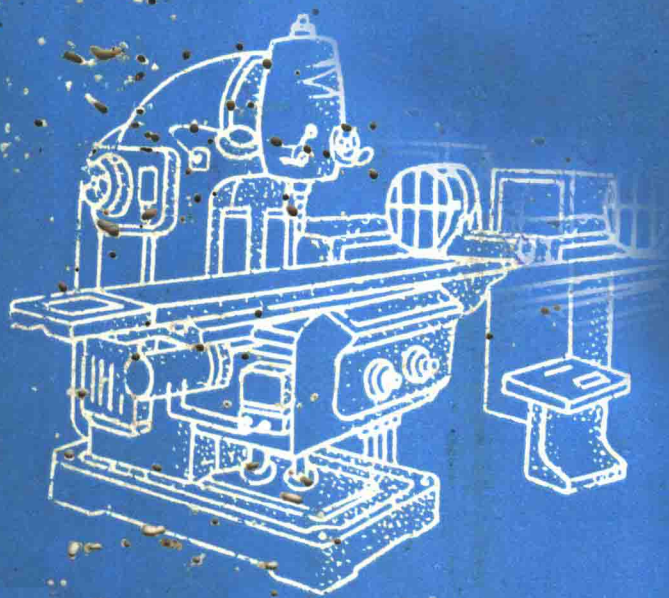


数控机床改造技术

陈绍廉 等编著



航空工业出版社

数控机床改造技术

陈绍廉 等编著

航空工业出版社

1989

内 容 简 介

本书可供高等院校及大专院校作教材使用。也可供研究所和工厂科技人员使用。

本书在内容编排上，力求系统、实用、机电一体，理论结合实际，注意到技术的新发展，并便于教学实施与自学方便。全书主要内容包括：数控机床改造技术适用的基本概念、理论、方法，数控机床的主要部件（步进电机、功率放大器和电源、滚珠丝杠、数控装置等），改装的方案选择与实例，数控车床改装（包括传动系统、自动转位刀架、输入输出、接口、软件、显示等），数控铣床改装，数控钻床改装，数控磨床改装，诊断与模拟（动态图形显示），STD总线与十六位单板机的基本知识与应用，CAD/CAM系统的组成与联机应用，此外并附有较充分的软件（即有关程序）和注解。

数 控 机 床 改 造 技 术

陈绍廉 等编著

航空工业出版社出版发行
(北京市和平里小关东里14号)

—邮政编码: 100013—

全国各地新华书店经售
南京航空学院印刷厂印刷

1989年6月第1版

1989年6月第1次印刷

开本: 787×1092毫米 1/16

印张: 10

印数: 1-2800册

字数: 246.4千字

ISBN 7-80046-137-8/TP·012

定价: 2.20 元

前 言

本书主要是为适应机械制造专业教学的需要，作为专业必修课或选修课的教材而编写的。学习前学生应具有微机原理及应用和金属切削机床的知识。

众所周知，机床向计算机数控自动化方向发展，已经是国内、外科技界论证一致的结果。而用原有设备，以先进的电子器件加以改装成较先进的设备使用，已是世界各国（包括美、日等国）行之有效的技术对策。我国已大力推广数控机床改造技术（或称改装技术）。各厂、所、院校也都提出机制专业要大力培养机电结合型的技术人才，以适应当今学科相互渗透，技术相互综合的形势。各种学习班的实践以及多方调查均证明，开设机电结合的本课程实属必须。

本书系统地介绍了各种数控机床改装的基本理论、基本技术、设计计算、重要机构以及复杂的计算机程序，以便学习者能真正掌握并加以应用。

为精简内容，突出主干，本书以车床的改装为重点，对其它类型机床的改装则介绍其区别特殊部分。其中有一部分内容及实例均系我们八年来从事数控机床改造的实践与体会，都经受过实践考验，并注意到教学的要求和可接受性，再加上国内收集的有关资料，最后编著出本书。

参加编著的成员有陈绍廉（兼主编）、竺钦尧、尉忠信、王显銜、陈桂隼、钱亦非、徐志良。本书由陆翠英副教授审阅，在此表示感谢。

本书除供各类大中专学校机械设计、制造类专业作为教材外，亦可供厂矿和研究单位的技术人员和高级技工学习参考。

由于编著者水平有限，书中如有缺点或错误之处，敬请读者批评指正。

编著者

1988年10月

目 录

第一章 概论	(1)
一、数控机床改造的意义	(1)
二、数控机床工作原理	(2)
三、数控系统的主要部件介绍	(3)
四、数控机床改装设计步骤和方案选择	(18)
第二章 数控车床改装	(24)
一、概述	(24)
二、传动系统	(26)
三、自动转位刀架	(32)
四、主轴变速系统	(37)
五、车床数控系统	(39)
六、输入	(51)
七、显示	(57)
八、直线插补和圆弧插补软件及监控程序和说明实例	(61)
第三章 数控铣床改装	(62)
一、概述	(62)
二、传动系统	(63)
三、数控程序(软件)设计	(64)
第四章 数控钻床改装	(80)
一、概述	(80)
二、仿真编程程序设计	(81)
三、检查与修改程序	(82)
四、加工程序	(84)
第五章 数控磨床改装	(85)
一、概述	(85)
二、磨床微机控制系统及软件设计	(90)
第六章 诊断与仿真模拟	(98)
一、概述	(98)

二、计算机数控系统的诊断.....	(98)
三、数控编程的动态图形模拟.....	(103)
第七章 十六位微机控制机床.....	(109)
一、概述.....	(109)
二、微机控制机床的硬件及软件.....	(110)
三、经济型的 CAD/CAM 系统——微机型 CAD 与数控加工的结合.....	(123)
附录一 多坐标数控车床通用软件实例.....	(129)
附录二 十六位微机 Intel-8086 硬件基本概念 和指令系统.....	(144)
附录三 STD 总线插脚分配表.....	(153)
参考文献.....	(154)

第一章 概 论

一、数控机床改造的意义

数控机床改造在国外已发展成一个新兴的工业部门。早在 60 年代已经开始迅速发展，并有专门企业经营这门业务。其发展的原因是多方面的。

首先是技术的原因。在过去的 20 年里，金属切削的基本原理变化不大，但社会生产力的巨大发展，要求制造技术向自动化及精密化前进。而刀具材料和电子技术却有很大进步，特别是微电子技术、电子计算机的技术进步，反映到控制系统中来，它既能帮助机床自动化又能提高加工准确度。这些技术进步和高生产率的要求、精密加工和型面加工的增多等，突出了旧机床技术改造的必要性及迫切性。

其次是经济上的原因。许多发达国家都作过统计分析，如果旧机床设备以新设备更新，一个国家每年要支付很多亿美元。若采用“改造”技术（主要是数控技术）加以现代化，则可以节约 50% 还多的资金。这种事半功倍的技术，不仅为资金不充沛的小型企业技术改造开创了新路，而且对实力雄厚的大型企业也有极大的经济吸引力。

第三是市场的原因。据统计，目前许多国家设备更新所需的数控机床数量，按机床工业现状是无力及时提供的。因此，机床“改造”就成为满足机床市场需求的主要补足手段。

第四是生产上的原因。在工业生产中，多品种、中批量及小批量生产是现代机械制造业的基本特征，占有相当大的比重。完成这些生产任务，不外乎选择通用机床、专用机床或数控机床，如图 1-1 及 1-2 所示。不难看出，数控机床最能适应这一需要。

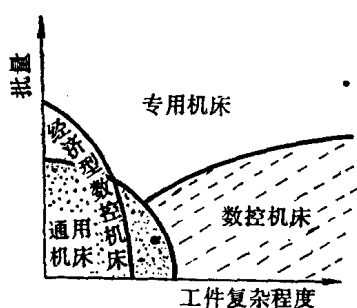


图 1-1 各类机床的适用范围

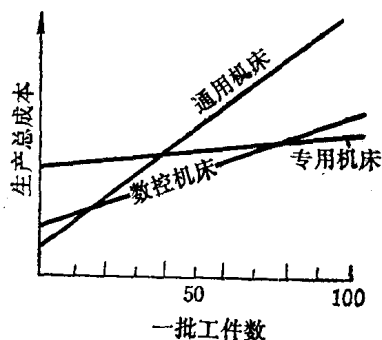


图 1-2 选用机床加工与生产批量间的关系

我国是拥有 300 多万台机床的国家。而这些机床又大量是多年累积生产的通用机床，自动化程度不高，要想在近几年内大量用自动、半自动和精密设备更新现有机床，不论资金和我国机床制造厂的能力都是办不到的。因此，尽快将我国现有一部分普通机床实现自动化和精密化改装，是我国现有设备技术改造迫切要求解决的课题。用数控技术改造机床，正是适应了这一要求。它是建立在微电子现代技术与传统技术相结合的基础上。在机床改造中引入

微机的应用，不但技术上具有先进性，同时，在应用上比其它传统的自动化改装方案，有较大的通用性与可调性。而且所投入的改造费用低，一套经济型数控装置的价格仅为全功能数控装置的 1/3 至 1/5，用户承担得起。从若干单位成功应用的实例可以证明，投入使用后，确实成倍地提高了生产效率，减少了废品率，取得了显著的技术经济效益。因此，我国提出从大力推广经济型数控这一中间技术的基础上，再逐步推广全功能数控这条道路，适合我国的经济水平、教育水平和生产水平，已成为我国设备技术改造主要方向之一。同时，它还可以作为全功能数控机床应用的准备阶段，为今后使用全功能数控机床，培养人才，积累维护、使用经验，而且也是实现我国传统的机械制造技术朝机电一体化技术方向过渡的主要内容之一。

二、数控机床工作原理

图 1-3 所示为一改装后的数控车床组成部分。工作人员按加工图纸 1 要求，编写数控加工程序单 2，然后将规定的程序命令（数据及规定的代码）用手工直接（即 3）或用计算机 4 经磁带 5 记录，间接地输入车床的控制计算机 6。自 6 输出的脉冲讯号，按程序要求有规律地经功率放大器 7 放大，然后去操纵 x 向及 z 向的两个步进电机 8 和 9，再经变速箱 10 及 11，驱动滚珠丝杆 12 和 13，使纵拖板 14 及横拖板 15 带动刀架按程序命令动作。

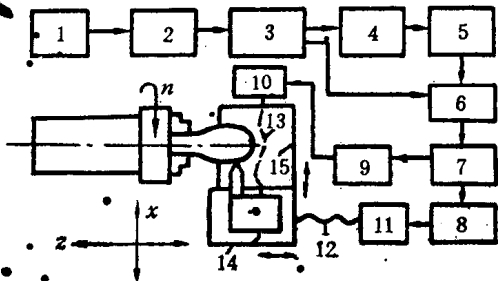


图 1-3 数控机床原理

如车手柄（图 1-4(a)）时，分别使刀架在 x 向及 z 向进给一定的 Δx 及 Δz 值，使运动尽量吻合所车手柄的廓线，即逐步加工出整个曲面来。同样，加工锥度也类似。图 1-4(b) 为同样原理，数控铣刀 2 加工出凸轮 1 外廓的情况。图 1-4(c) 为数控钻床自动完成一群孔加工的示意图。

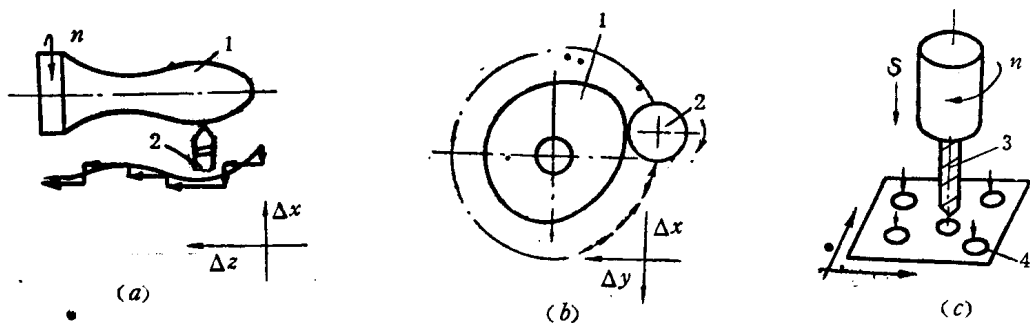


图 1-4 数控机床加工原理

上述数控机床原理称为开环数控系统（图 1-5）。图 1-6 为闭环数控系统，其工作台的实际位移量还采用一个测量装置去检测出来，然

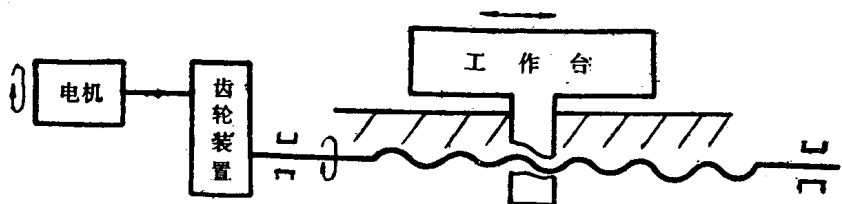


图 1-5 开环数控系统

后反馈回去与控制机发出的指令值进行比较，用二者的差值再进行控制，理论上要使差值等于零为止。所以闭环系统精度可以做到比开环系统高，但系统较复杂，调试及维修都较困难，成本也高。目前国内市场也有经济型的半闭环系统，图1-7是一种半闭环系统，主要是检测装置设置在丝杠上，其特点基本上是介乎开环与闭环之间。

三、数控系统的主要部件介绍

本书主要是供具有一定机电知识基础的人们使用，但仍有必要对数控系统主要部件作适当介绍，以便使在这方面不太熟悉的学习者能逐步掌握，以承担数控机床改装的工作。本章将对步进电机、功率放大器、滚珠丝杠等主要通用部件作扼要介绍，其他较专用的部件在各章介绍。

(一) 步进电机

步进电机能将计算机输出的每一个脉冲信号变成一定量的机械角位移（称步距角）。通过滚珠丝杠副使工作台或拖板作精确的位移。

1. 步进电机的工作原理

步进电机由转子和定子组成，其工作原理如图1-8所示。定子上有六个极，各极上装有控制绕组，每两个相对的极为—相，即分为A, B, C三相绕组，转子上有四个等距的齿，其工作原理与一般电动机不同，实际上它就是利用电磁铁的作用原理。定子的三相绕组依次通电，转子被吸引着一步步前进，转子便旋转起来。

(1) 开始时A相通电，转子1、3两齿被A极吸引。

(2) 然后B相通电，A相断

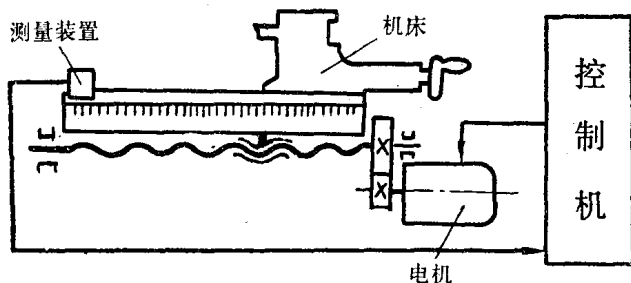


图 1-6 闭环数控系统

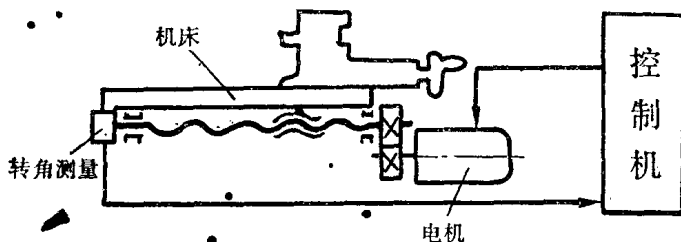


图 1-7 半闭环数控系统

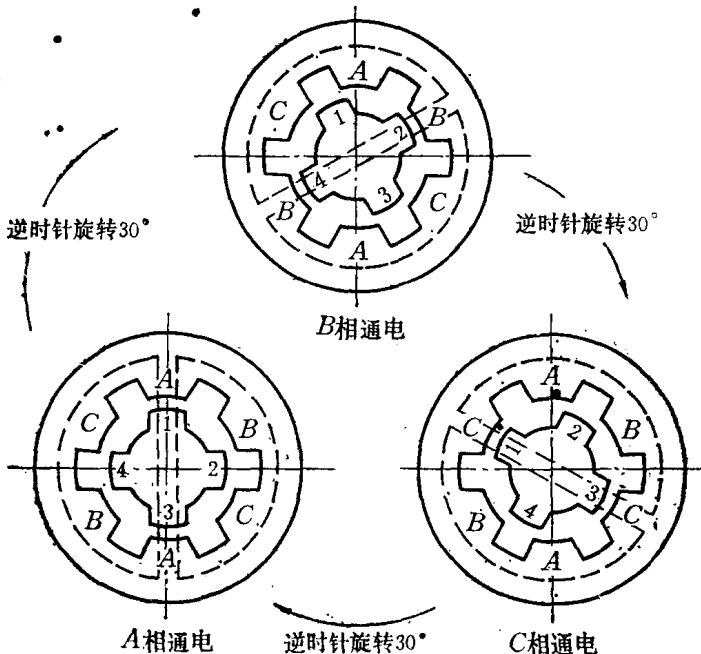


图 1-8 步进电机的工作原理（三拍）

电, 转子 2、4 两齿被 B 极吸引, 转子逆时针旋转 30° 。

(3) C 相通电, B 相断电, 转子又逆时针旋转 30° 。1、3 二齿对准 C 极。

(4) 再回到 A 相通电, C 相断电, 转子又逆时针转 30° 。所以, 按 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C$ 顺序通电时, 步进电机则不断逆时针转动。如按 $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow C$ 顺序通电, 则顺时针转动。但这种方式易失步, 即少转了应转的角度, 而且易在平衡位置附近振荡。为此, 常用所谓三相六拍控制方式, 即按 $A \rightarrow AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CA \rightarrow A$ 进行。按步进电机的相数不同, 还常用五相十拍和六相十二拍等控制方式通电, 这时每步转角减半。步进电机还有如下特点:

1) 步距值不受各种干扰因素影响, 如电压的大小, 电流的数值, 波形与温度的变化等都不影响步距值, 也就是说, 转子运动的速度主要取决于脉冲信号的频率。

2) 没有长期累积误差, 步进电机每走一步所转过的角度(实际步距值)与理论步距值之间总有一定的误差。从某一步到任何一步, 即走任意一定的步数以后, 也总有一定的累积误差, 但是它每转一圈的累积误差为零, 所以步距的误差不会长期累积下去。

3) 控制性能好。步进电机的起动、停车、反转及其他任何运行方式的改变, 都在少数脉冲内完成, 它能长期锁定在步距值的任意整拍数处。

4) 它的不足之处是要求配备专用的驱动源, 特别是对输出力矩较大的步进电机, 它的驱动源一般说来都是电路比较复杂, 运行效率不高, 体积较大, 工作可靠性还不十分令人满意, 造价也不太便宜。但近年来由于电器元件质量提高, 品种更新, 电路改进, 性价比有很大改善, 体积也减小很多。

2. 步进电机的主要指标

(1) 步距角 θ

每输入一个脉冲信号, 电机转子所转角度的理论值。通常为 0.75° 、 1.5° 和 3° 三种。

(2) 转矩

静转矩是指绕组内电流值不变, 转子处于锁定状态不旋转时的电磁转矩, 它的值取决于绕组内电流的值。

动转矩是指转子运转情况下最大输出的转矩值, 它与运行的频率有关。当脉冲频率愈高时, 驱动源所提供的电流波形将愈偏离于理想的矩形, 且峰值也会有所降低, 因此频率愈高, 输出转矩也愈小, 矩频特性通常都是下降的。

(3) 突跳频率

也称为起动频率, 它是指能不丢步地起动的极限频率。对于一定的电机和配用一定的驱动器情况下, 突跳频率与负载的大小有关。在无负载条件下的突跳频率称为空载突跳频率。

(4) 运行频率

是指频率连续上升时, 电动机能不失步运行的极限频率, 它的值也与负载大小有关。很显然, 在同样的负载下, 运行频率总高于突跳频率。

表 1-1 常用的国产步进电机的性能指标

型 号	步 距 角 (度)	最大静转矩 (kgf·m)	空载突跳频率 (步/秒)	运行频率 (步/秒)	相 数	电 压 (V)	相电流 (A)
90BF001	0.9/1.8	0.4	2000	8000	4	80	7
90BF002	0.75/1.5	0.4	3800	16000	5	80	7
90BF003	1.5/3	0.2	1500	8000	3	60	5
90BF004	0.75/1.5	0.25	4000	16000	5	60	7
110BF003	0.75/1.5	0.8	1500	7000	3	80	6
110BF004	0.75/1.5	0.5	500	约4000	3	30	4
130BF001	0.75/1.5	0.95	3000	16000	5	80/12	10
150BF002	0.75/1.5	1.4	2800	8000	5	80/12	12
150BF003	0.75/1.5	1.6	2600	8000	5	80/12	13

(二) 功率放大器

功率放大器通常即指步进电机驱动电源，它实际上由两部分组成，即功率放大部分和逻辑部分。逻辑部分是将输入的脉冲信息转换成为步进电机所要求的有一定相序和时序的矩形波。这一部分常称为环行分配器。例如：对三相六拍的步进电机，它所要求的各相波形的时序如图 1-9 所示；而对于五相十拍的步进电机，其各项波形的时序如图 1-10。分配器的作用就

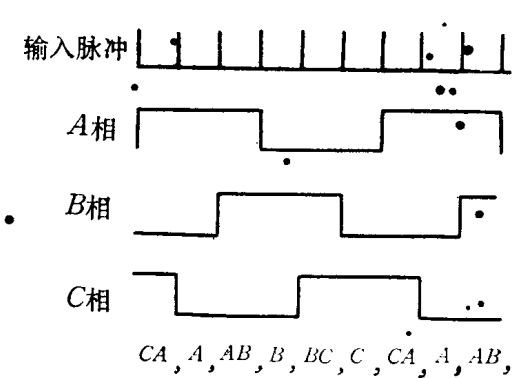


图 1-9 三相六拍步进电机各相波形的时序

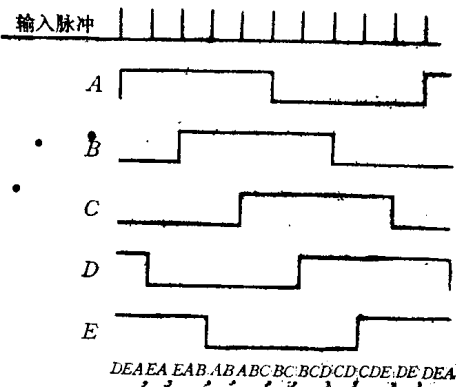


图 1-10 五相十拍步进电机各项波形的时序图

是在输入脉冲的控制下产生出有一定时序的多相矩形波，以便分别去控制和驱动步进电机的各绕组。下面以五相十拍电机为例，如果输入脉冲的最高频率为 4 kHz，则每一相矩形波的宽度为 1.25 ms，这时步进电机的转速最高，如果输入脉冲频率降低，则每相矩形波宽度增大。如果控制分配器使相序变成 DEAE—DE—CDE—CD—BCD—BC—ABC—AB—EAB—EA—DEA，则步进电机将反向旋转。

分配器输出的矩形波功率很小，不能直接驱动电机，所以还要通过一个功率放大器，它在分配器输出的波形控制下产生强大的矩形波电流，分别输入到步进电机的各相绕组中，以达到功率驱动的目的。通常所说步进电机驱动电源就指这个动力部分，它不一定包含有分配器。下面来分析功率驱动部分的作用原理和电路。

1. 单电源电路

不论步进电机相数的多少，它们各相之间都是分别单独驱动的，因此要了解驱动源，只需要分析其中一相的驱动电路。而对于一个相的驱动电路来说，它的负载就是步进电机中某一相的绕组。

步进电机每一相的绕组具有一定的电感 L 和电阻 R ，根据电机力矩的大小，要求输入一定峰值的电流 I 。设电机绕组的电感量 $L=5\text{ mH}$ ，绕组电阻 $R=0.1\Omega$ ，要求电流峰值 $I=10\text{ A}$ ，这些具体数据近似为一个转矩为 $0.8\sim 1\text{ kgf}\cdot\text{m}$ 的步进电机的实际情况。在分析中引用这些具体数据，能使我们更实际和更具体地了解驱动源的工作。

图 1-11 是一种最简单的驱动电路，图中直流电源 E_c 通过开关三极管 T 接到电机绕组。在电机绕组线圈两端并联了一个续流二极管 D ，它的作用将在下节中说明。当开关管 T 的基极加有来自分配器的矩形波控制电压时，开关管 T 将周期性的导通和截止，使电路接通和开断，在绕组线圈中产生接近于矩形波的电流。下面我们就将着重分析这个电流的波形，特别是这个电流波形的上升沿和下降沿。

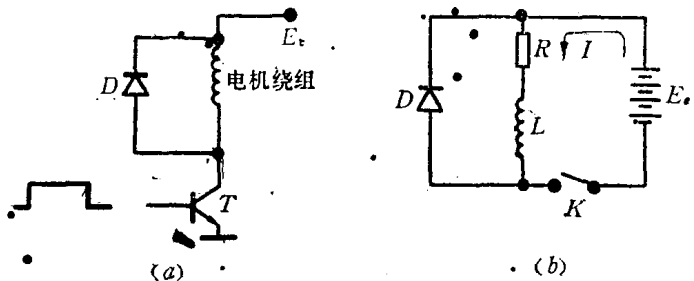


图 1-11 最简单的驱动电路

(a) 驱动电路 (b) 等效电路

为了清楚起见，我们将图 1-11 (a) 的实际电路绘成如图 1-11 (b) 的等效电路。这里用开关 K 代替三极管 T ，并且将绕组的电感 L 和电阻 R 都表示出来。下面就来分析这个电路的工作。

(1) 电源电压 E_c

当开关 K 接通以后，要使电路中有稳定电流 I ，则电源电压 E_c 应为

$$E_c = IR \quad (1-1)$$

设 $I=10\text{ A}$ ， $R=0.1\Omega$ ，显然所需电源电压 E_c 为 1 V 。

(2) 电流波形的上升沿

图 1-11 电路中的电感是一个惯性元件，它将阻碍电路中的电流变化。当开关 K 接通以后，电路中的电流并不能马上上升到稳定值，而是要按如下的规律增长

$$i = \frac{E_c}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = I (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-2)$$

式中 I 为电流的稳定值， $I=E_c/R$ ； τ 为电路的时间常数

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (1-3)$$

电流增长曲线是如图 1-12 (a) 所示的一条指数规律曲线，当时间 $t=\tau$ 时，电流将从零上升到稳定值 I 的 63.2%，当 $t=3\tau$ 时，电流达到稳定值 I 的 95%，较接近于稳定值。

在所述例中， $L=5\text{ mH}$ ， $R=0.1\Omega$ ，因此，时间常数为

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{5\text{ mH}}{0.1\Omega} = 50\text{ ms} \quad (1-4)$$

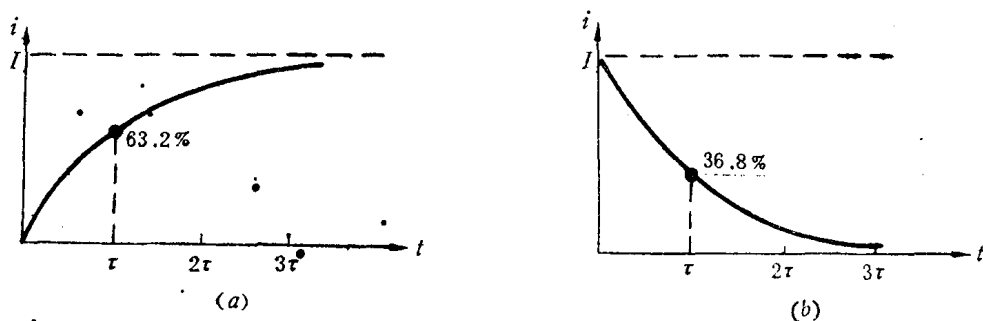


图 1-12 驱动电路电流规律
(a) 上升规律 (b) 下降规律

即当开关接通以后,要经过 $3\tau=150\text{ ms}$ 的时间,电流才能上升到 9.5 A ,接近 10 A 的稳定值。

如果步进电机运转的速度很低,即加于开关管基极的控制矩形波宽度为 1 s 或更宽时,这样长的电流上升时间与矩形波的宽度相比仍可忽略,因此电流波形仍近似于矩形。但是当电机以较高速率旋转,控制矩形波的宽度只有几个毫秒时,电路中的电流只能增长到十分之几安培就要下降,根本不可能上升到接近稳定值,显然这时电机就不会转动了。

(3) 电流波形的下降沿

现在假设图 1-11 电路中开关 K 接通了一段时间,电路中的电流已经达到了稳定值,然后断开开关,看绕组中电流的下降规律。

如果线圈两端没有并联二极管 D ,则当开关断开以后,电路中的电流要突降到零,这时,在电感的两端将产生很大的自感电势,足以将开关管 T 击穿而损坏,因此不接二极管 D 的电路是不安全的。

接入二极管 D ,当开关断开时,线圈中电流将沿二极管流通,储存在线圈中的磁场能量逐渐释放,消耗在电阻 R 上,电路中电流逐渐减小,最后到零。电流下降的规律如下

$$i = I e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-5)$$

它仍是一条指数曲线,当时间 t 等于电路的时间常数 τ 时,电流降掉了稳定值 I 的 63.2% ,还剩下 $36.8\% I$,如图 1-12 所示。经过了 3τ 的时间后,电流只剩下为稳定值的 5% ,这时就可近似地认为是能量释放完毕,电路中电流等于零。

从图 1-11 的电路中可见,若认为二极管是理想的,则电路的时间常数 τ 仍然是

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{5\text{ mH}}{0.1\Omega} = 50\text{ ms} \quad (1-6)$$

即放电结束,电流下降到零的时间约需 $3\tau=150\text{ ms}$ 。

综上所述,可得到控制波形宽度不同的电机绕组中电流的波形如图 1-13。从图中可见,当控制波形很宽时,电流波形仍接近于矩形波(图 1-13(a));当控制电压的周期为 1 s 时,电机绕组中电流的上升和下降沿就非常明显(图 1-13(b));而当控制电压的周期更短,频率更高时,电流波形就近似为三角波,而且它的峰值就远小于其稳定值了(图 1-13(c))。

由此可见,这种简单电路只能驱动步进电机作低速旋转,实用价值不大。要能驱动电机作较高速的旋转,必需加速绕组中电流的上升和下降速率,从以上分析可见,即必须减小电

路的时间常数 $\tau=L/R$ 。而在电机绕组电感一定的条件下,要减小时间常数,就只有增加电路中的电阻了。

加有限流电阻 R_1 的单电源驱动电路如图 1-14 所示,图 1-15 是它的等效电路。如果仍然假设电路中的峰值电流为 10A,并取直流电源电压为 30V,则电路的总电阻应为

$$R_1+R=\frac{E_c}{I}=\frac{30}{10}=3\Omega$$

实际上因为电机绕组线圈的内阻 R 很小,可以取限流电阻 R_1 就是 3Ω ,这时若线圈电感仍为 5mH,则电路的时间常数 τ 为

$$\tau=\frac{L}{R_1}=\frac{5\text{mH}}{3\Omega}=1.67\text{ms} \tag{1-7}$$

这样就比不加限流电阻时的电流上升下降时间小得很多,从而使步进电机的转速可以大为提高。对于这种电路,下面再作几点说明:

1) 当控制步进电机作高速旋转、加于开关管 T 基极的控制矩形波宽度小于 5ms 时,如上列数据,电路中的电流不可能达到稳定值 10A,这时电机仍能旋转,但输出的转矩将达不到额定值。

这就是说随着控制脉冲频率的提高,电机转速加快,但它输出的力矩将因电流达不到稳定值而下降,这就是步进电机的力矩-频率特性(简称矩-频特性)随频率提高而下降的原因。由于不可能将电流上升和下降的时间无限减小,所以任何步进电机的矩-频特性都是下降的,好一些的驱动电源能使电机的矩-频特性下降得缓慢一些。

2) 从图 1-14 的电路可见,为了减小电路的时间常数 τ 而加入限流电阻 R_1 ,必需提高直流电源电压 E_c ,大大增加电路的能量损耗,效率很低。大部分电能电阻 R_1 上转变为热能,为了发散掉这些热能,又不得不增大机箱体积和加入通风散热装置。由此可见,为了加速绕组中电流上升和下降的速率,是付出了很大代价的。因此这种单电源电路只适用于驱动中小型的步进电机,对于绕组电流大于 6~8A 的步进电机,通常都采用高低压驱动电路。

2. 高低压驱动电路

步进电机的输出力矩在 0.8 kgf·m 以上,其绕组工作电流在 8~10A 以上时,多采用高低压两个电源的驱动电路,高压电源一般为 80~120V,低压电源一般为 12V,这是很典型的电路。

图 1-16 为用高低压驱动的原理电路。图中低压电源 E_{c1} 通过二极管 D_1 和限流电阻 R_1 加到电机绕组线圈上,下面接有开关三极管 T_1 。限流电阻 R_1 通常为 1Ω 左右,当开关管 T_1 较

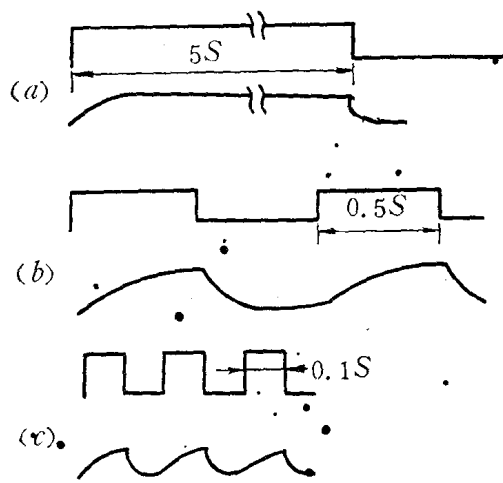


图 1-13 电流波形

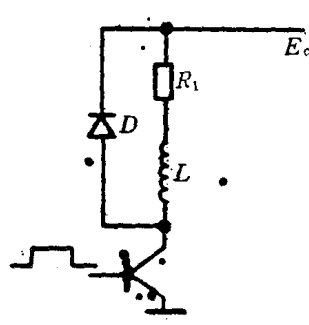


图 1-14 单电源驱动电路

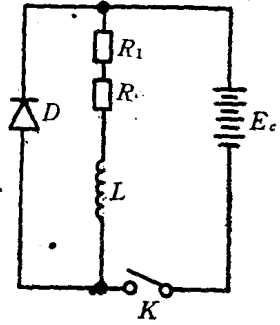


图 1-15 图 1-14 的等效电路

长时间导通时，在 12V 的低压电源作用下，限制绕组线圈中的电流约为 10A。80V 的高压电源 E_{c2} 通过开关三极管 T_2 加到 R_1 和 L 上。二极管 D_2 是起续流作用的。

电路的工作过程如下：

控制电压的上升沿同时加到开关管 T_1 和 T_2 的基极，使 T_1 和 T_2 同时导通，这时 80V 的高压电源就直接加到限流电阻 R_1 和线圈 L 上，利用加外高压来加速线圈 L 中电流的上升速率。低压电源 E_c ，则因受二极管 D_1 的隔离，对电路无影响。但是高压电源是不应当长期加在电路上的，因为限流电阻 R_1 只有 1Ω ，将会使线圈中的电流大大超过其额定值，因此上面的开关管 T_2 应能自动断开。一种方式是采用定时电路，使上管 T_2 导通一定时间后就自动断开；另一种方式是当流过上管的电流达到某一预定值（通常等于或稍小于绕组的额定电流值）后，使上管 T_2 自动断开。前者称为定时电路，后者称为定流电路。一旦上管 T_2 断开后，80V 的高压电源就停止供电，这时 12V 的低压电源就通过二极管 D_1 自动接入电路，使电路中的电流维持在稳定值，直到控制矩形波的后沿来到。使下管 T_1 截止，低压电源也停止供电，于是开始了绕组中电流的下降过程。

在单电源电路中，积蓄在线圈中的磁场能量是通过续流二极管，泄放到限流电阻上，变成热能而散失掉。在双电源电路中，如果仍用这种方法，将因为限流电阻较小而延长了电流的下降时间，这与采用高压电源来加速电流上升是不相适应的。因此通常将续流二极管 D_2 直接接到高压电源上，使泄放的磁场能量馈送到电源中去，既实现了能量回收，又加速了绕组电流的下降。这种电路就按上述过程周期性地工作。为了对这一过程有更深入的了解，对它作一些定量分析。

(1) 绕组电流的上升沿

绕组中电流增长的时间仍然是用公式 (1-2) 来计算，现将该式重写如下：

$$i = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

但是在这里

$$E = E_{c2} = 80V$$

$$R = R_1 = 1\Omega \text{ (略去电机绕组的内阻)}$$

因此得

$$i = 80(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-9)$$

这个电流的增长曲线将如图 1-17 所示，即当 $t = \tau$ 时，电流将上升到为 80V 的 63.2%，而当 $t = 3\tau$ 时，电流近似地达到 80A。实际上电路并不允许电流增长到这样大，如果采用定流方式并且预定好当电流增长到 10A 时就使上管 T_2 自动断开，电流停止继续增大，现在我们用式 (1-9) 来计算电流从零增长到 10A 所需要的时间，即

$$i = 80(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = 10$$

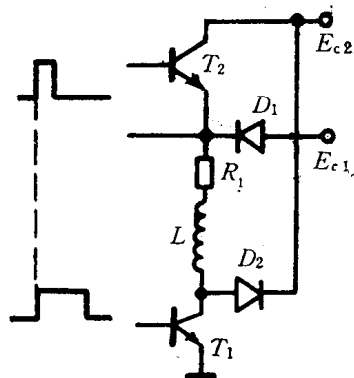


图 1-16 高低压驱动电路

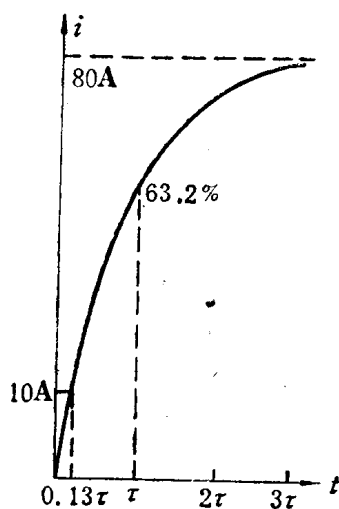


图 1-17 高压作用下的电流增长曲线

由上式算出时间 t 为

$$t = -\tau \ln\left(1 - \frac{10}{80}\right) = 0.13 \tau$$

在现在的电路里，限流电阻为 1Ω ，若仍设电机绕组的电感为 5mH ，则时间常数 τ 为

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{5\text{mH}}{1\Omega} = 5\text{ms}$$

由此得电流从零增长到 10A 所需的时间为

$$t = 0.13 \tau = 0.65\text{ms}$$

这个结果表明，用高压电源来加速电机绕组中电流的增长速度，效果是何等显著。

如果采用定时电路，所定的时间也应在 0.6ms 左右，其结果与上述定流电路是近似的。

(2) 绕组电流的下降沿

前已说明，在高低压驱动电路中，续流二极管 D_2 是接到 80V 电源上，这样既回收了能量，又加速了电流的下降时间。现在我们就来具体计算这个下降时间。

当两个开关管 T_1 和 T_2 都截止以后，图1-16的电路可改绘成如图1-18所示。由于电感线圈中的电流下降而产生反电势，它的大小为 $L \frac{di}{dt}$ ，它的方向如图中所示。

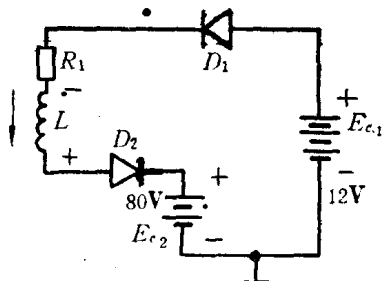


图 1-18 续流工作时的简化电路

如果略去电路中的电阻 R_1 ，并认为二极管 D_1 和 D_2 都是理想的，则可得到下面的等式

$$12 + L \frac{di}{dt} = 80$$

解之得

$$\frac{di}{dt} = \frac{80 - 12}{L} = \frac{68}{5\text{mH}} = \frac{68\text{V}}{5\text{mH}} = 13.6\text{A/ms}$$

这说明电流下降的速率为 13.6A/ms ，由此可以算出绕组中电流由 10A 下降到零所需要的时间为

$$10\text{A} \div 13.6\text{A/ms} = 0.735\text{ms}$$

很明显，这个电流下降时间也比单电源电路要快得多。

通过以上的计算可见，高低压驱动电路比单电源电路优越得多，所以输出力矩在 $0.8\text{kgf}\cdot\text{m}$ 以上的步进电机，大都采用这种驱动电路。单电源驱动电路虽然指标不高，但它的电路非常简单，仍常用来驱动力矩较小的步进电机。

(3) 开关管的推动级

前面已详细分析了高低压驱动电路中由两个开关管所组成的输出级的工作情况和波形，本节将叙述推动开关管正常工作的各前置电路。

如所知，开关管接通和断开的电路中有 10A 或更大的电流，因此开关管本身是功率较大的晶体管。要使这种大功率的晶体管导通这样大的电流，在它的基极要求有 1A 以上的输入电流来激励，即开关管的电流放大倍数通常为 10 倍左右。但从分配器送来的控制信号只能提供 1mA 左右的电流。所以从输入端到功率开关管基极之间加入了三级放大电路，如图1-19所示。

先看下面开关管的推动电路。从分配器来的信号加到放大管 T_{101} 、 T_{102} 和 T_{103} 三级放大。输出 1A 以上的电流加到末级开关管 T_{104} 来控制它的导通和截止。这三级放大器所用电源为 E_{c3} 。为了指示分配器送来的信号是否已到开关管 T_{104} 的基极，在 T_{103} 的集电极负载电阻上并联了一个指示灯，并将指示灯装在面板上，用它可以指示出电路的前置放大部分工作是否正常，但不能指示末级两个大功率开关管 T_{104} 和 T_{107} 是否烧坏。

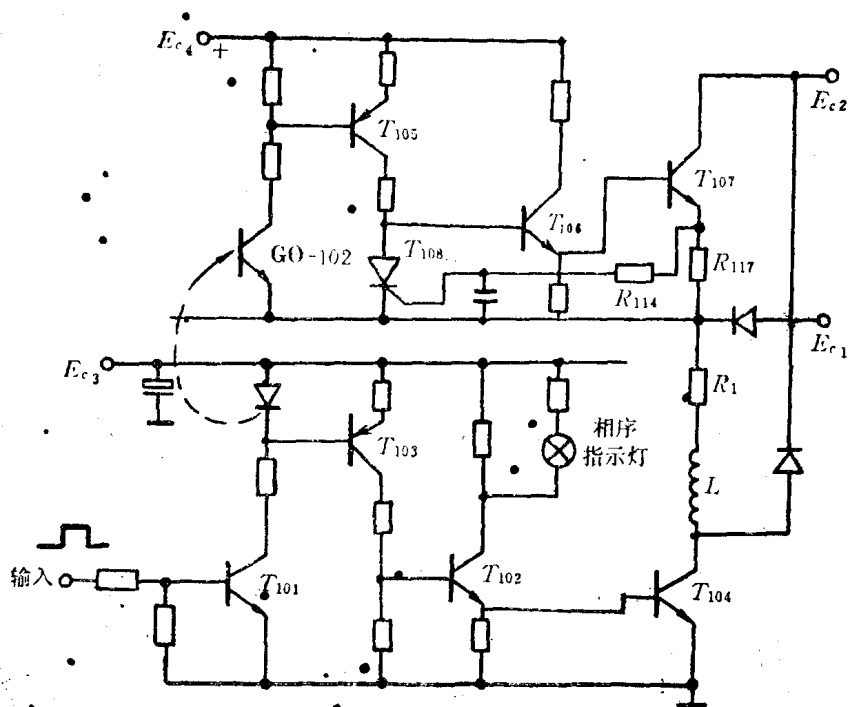


图 1-19 功率放大部分的电路

控制高压电路中开关管 T_{107} 的信号，是从下面电路中第一级放大管 T_{101} 的集电极电路引出的。这里用了一个光耦合管 GO-102。光耦合管是用一个发光二极管和一个光敏三极管封装在同一管壳中而组成的，如图 1-20 所示。当有正向电流流过二极管时，它将发出光线，并照射到光敏三极管，如果三极管外电路接有电源和负载，则三极管在光照下能产生电流在外电路流通。光耦合管的特点是在输入和输出之间是通过光线来耦合，其间没有电的连接，因此在输入和输出之间有良好的电的隔离作用。

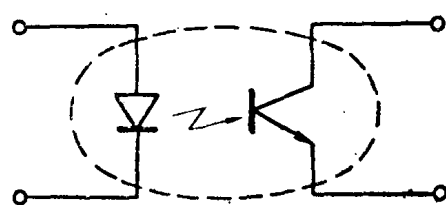


图 1-20 光耦合管

光耦合管的二极管部分接在 T_{101} 的集电极，而它的三极管部分就是上面电路中的第一级放大管。当从分配器来的信号使下面电路 T_{101} 导通时，通过光耦作用，上面电路也同时导通，再经过 T_{105} 和 T_{106} 两极放大，也输出 1A 左右的电流去推动上开关管 T_{107} 。上电路的电源 E_{c4} 的负端不能接地，应接成如图 1-19 所示。正是由于上下两前置级的电源 E_{c3} 和 E_{c4} 不共地，所以要用光耦管来作电的隔离，同时又保证了在一个分配器电压的控制下，能使上下两电路同时导电，去推动上下两开关管 T_{104} 和 T_{107} 同时导通。

前已说明，当上下两开关管在控制矩形波作用下同时导通后，80V 的高压对电机绕组供电，以加速电流的上升。但经过一短时间后，或者以定时方式，或者以定流方式，应使上管