

A vertical decorative band on the left side of the cover, featuring a dark purple background with white line art of various pulse waveforms, including triangular, square, and trapezoidal shapes.

脉宽调速系统

徐 强 童海潜 编著

上海科学技术文献出版社

脉宽调速系统

徐 强 童海潜 编著

上海科学技术文献出版社

脉宽调速系统

徐 强 童海潜 编著

*

上海科学技术文献出版社出版
(上海市武康路2号)

兵考书店上海发行所发行
宜兴南漕印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 3.75 字数 85,000

1984年8月第1版 1984年8月第1次印刷

印数: 1—6,400

书号: 15192·329 定价: 0.48 元

《科技新书目》78-203

前 言

“脉宽调速系统”是七十年代后期才发展起来的一种新的直流调速方法。鉴于它具有能在极低转速下平稳运行以及快速性好等一系列优点,国外已在数控机床等产品上采用该技术。随着我国工业的发展,提供了实现脉宽调速的关键元件(如小惯量电机、大功率、高反压晶体管等),因而应用该技术的条件已日趋成熟,目前,国内已有单位在进行研制,但尚无专著,因此及时介绍这项新技术,想必对电气传动技术、精密机床技术的发展会起一定的推动作用。

本书简要介绍脉宽调速系统的工作原理、主回路及其控制电路。并通过两个应用实例说明系统分析和设计的基本方法。

本书供从事电气传动及工业自动化设计、运行的科技人员及有关专业的大专院校师生参考。

本书承上海市机电一局总工程师胡汝鼎教授审阅,并提出了宝贵意见,在此谨致深切谢意。

编 者

1983年9月

概 论

近年来,在高精度的伺服系统中,采用大功率晶体管脉宽调制伺服系统正受到人们越来越多的注意和重视,已由实验室研制逐步进入到工业领域的应用阶段。它采用晶体管脉冲调制型开关放大器(以下简称 PWM* 放大器)作为调速系统的功率输出级,对负载——执行电动机提供必要的驱动功率。

PWM 放大器的基本工作原理是利用对大功率晶体管开关时间的控制,将直流电压转换成某种频率的方波电压,加在直流电动机的电枢两端,通过对方波脉冲宽度的控制,改变电枢的平均电压 U_a ,从而达到调节电动机转速的要求,这就是所谓“脉宽调速”的原理。

从六十年代起,可控硅整流元件的问世,可控硅-直流电动机调速系统(KZ-D 系统)逐步取代直流发电机-直流电动机调速系统(F-D 系统),在工业领域中获得广泛的应用,它具备了弱电控制、强电输出的优点,但在实际使用中,可控硅输出的整流电压波形差、脉动大,导致电动机工作条件恶化、损耗增大,特别是在低电压、轻负载的情况下尤为严重,影响到低速运行的稳定性。在某些场合下,为了保持负载电流的连续性以改善电机的工作条件和系统的稳定性,不得不采用增大滤波电抗器的容量来解决,势必造成结构笨重、投资大。由于可控硅输出的整流电压与控制电压之间的关系不是线性关系,又存在一定的失控时间,这些问题都将影响系统动态品质的提高。而 PWM

* PWM 是英文 Pulse Width Modulated 的缩写。

放大器-电动机系统与可控硅-电动机系统相比有显著的优点。主要为:

第一,脉宽调制伺服系统,用工作于开关状态的晶体管放大器作为功率输出级,电路中的晶体管只工作在两种状态——饱和导通和截止状态,饱和导通时管压降很小,截止时漏电流很小,因此晶体管上的功率损耗主要发生在饱和与截止的过渡过程中,而这些过渡过程的时间很短,因此可使功率输出级的功率损耗很小,并且这个损耗在输出电压最高和最低时都是一样的,这就大大改善了输出级的晶体管在低速情况下的工作条件。

第二,晶体管的开关频率可以选得较高,仅靠电枢的滤波作用就可以获得脉动很小的直流电流,电枢电流容易连续,使低速平滑、稳定,因此调速比可以做得很大,最大可达到1:10000。由于其输出波形比可控硅系统好,在相同的平均电流即相同的输出转矩下,电机的损耗和发热较小。

第三,同样由于开关频率高,若与小型快速响应的电机相配合,则系统可以获得很宽的频带,因此系统的快速响应好,动态抗负载干扰的能力强。由于响应快,无滞后和惯性,特别适用于可逆运行,以适合于频繁起制动的高速定位控制和连续控制系统。

然而与可控硅相比,晶体管不能承受高峰电流,过载能力差,且目前性能不够稳定,价格较贵。

作为一项新颖的控制方式,PWM 放大器-电动机系统也有一个发展和不断完善的过程,由于它所具有的一系列的优点,正逐渐受到重视和得到推广应用。美国 GE 公司已经在数控机床产品上采用脉宽调制伺服系统,国内也有一些单位在研制中,并取得不少经验,随着大功率晶体管、低惯量直流电动机产品的完善,这一控制方式必将越来越多地被人们所采用。

目 录

概 论

第一章	脉宽调速系统主回路	1
1.1	不可逆开关放大器的工作原理	1
1.2	可逆开关放大器——T型开关电路的工作原理	3
1.3	可逆开关放大器——H型开关电路的工作原理	6
第二章	几个重要参数的确定	16
2.1	开关放大器中晶体管的开关过程	16
2.2	开关放大器的电流波动	24
2.3	开关放大器中晶体管的功率损耗	27
2.4	开关放大器工作频率的确定	29
2.5	开关管的选择	32
2.6	对开关管开放延时的考虑	33
第三章	脉宽调速系统的控制电路	34
3.1	脉宽调制器	34
3.2	逻辑延时电路	55
3.3	功率输出级的驱动电路	59
第四章	应用实例	65
4.1	脉宽调速系统分析与校正	65
4.2	应用实例一：用双极性T型开关放大电路的直 流调速系统	76
4.3	应用实例二：用单极性H型开关放大电路的直 流调速系统	91

第一章 脉宽调速系统主回路

脉宽调速系统主回路中功率输出级采用脉宽调制式型开关放大器, 简称 PWM 放大器。

PWM 放大器可有双极性工作制和单极性工作制两种, 构成可逆开关放大电路和不可逆开关放大电路, 下面就各种开关放大电路的工作原理及特征分别加以叙述。

1.1 不可逆开关放大器的工作原理

这里介绍一种具有制动状态的不可逆开关放大器, 其电路如图 1.1 所示。

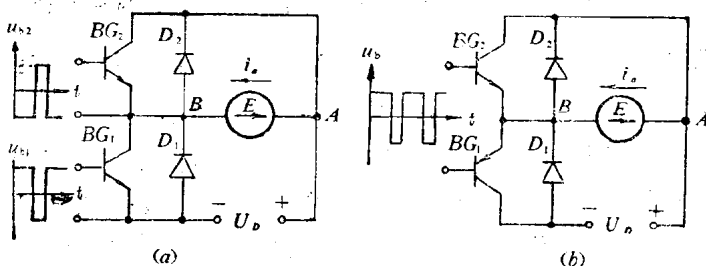


图 1.1 具有制动状态的开关放大器

直流伺服电机的不可逆开关电路多采用有制动状态的开关电路。这种电路的快速性好。它由三极管 BG_1 、 BG_2 和续流二极管 D_1 、 D_2 组成, 来自脉宽调制器的两个极性相反的脉冲信号加在 BG_1 和 BG_2 管的基极, 开关电路工作时的电压、电流波形如图 1.2 所示。

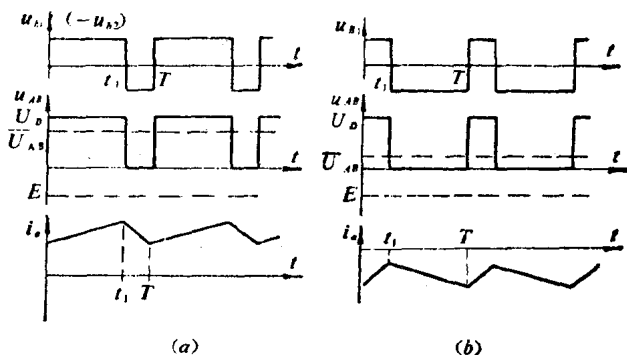


图 1.2 具有制动状态的开关电路的波形图

在一个周期内, 当 $0 < t < t_1$ 时, BG_1 的基极电压为正, BG_1 饱和导通, 电源电压通过 BG_1 加到电动机电枢两端, 此时由于 u_{b2} 为负, 故 BG_2 是截止的。当 $t_1 < t < T$ 时, u_{b1} 和 u_{b2} 改变极性, 使 BG_2 导通、 BG_1 截止, 由于电枢回路中存在着电感, 使电枢电流不能突变, 电枢电流可通过续流二极管 D_2 继续流通, 平均电流由负载力矩确定 $I_a = \frac{M}{C_M}$, 电机处于电动机状态, 电枢电压平均值 $\bar{U}_{AB}$ 大于反电势 E ($\bar{U}_{AB} > E$), 见图 1.2(a)。

当脉宽调制器的控制电压突然减小时, 电机由电动机状态进入制动状态, 此时由于电动机的惯性使 $E > \bar{U}_{AB}$ 。在一个周期的 $t_1 \sim T$ 区间内 ($t_1 < t < T$) BG_2 饱和导通、 BG_1 截止, 此时由于 $E > \bar{U}_{AB}$, 电枢电流经 BG_2 反向流通, 产生制动力矩 (能耗制动状态), 在 $0 \sim t_1$ 区间、 BG_2 截止, 因电枢电感的作用, 电枢电流不允许突变, 使 $L_a \frac{di_a}{dt} + E > U_D$, 电枢电流经 D_1 将能量反输给电源 (再生发电制动状态), 反向的电枢电流所产生的制动力矩使电动机转速迅速下降至新的给定值。

在 $0 \leq t < t_1$ 时, 等效电路如图 1.3(a) 所示, 电枢回路的方

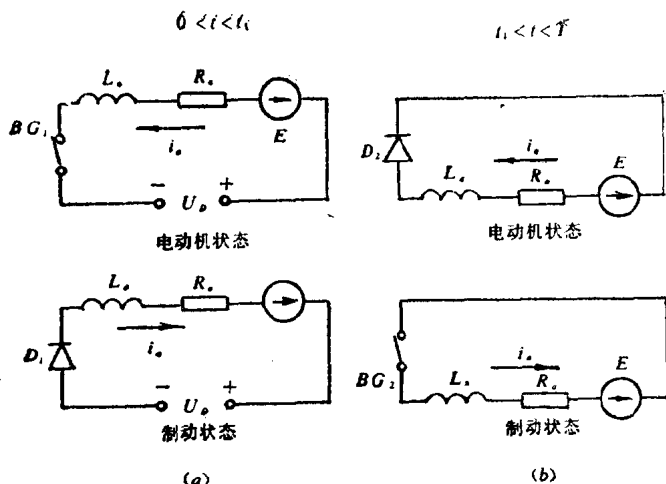


图 1.3 T型单极性开关放大器等效电路

程式为

$$U_D = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E \quad (1-1)$$

$t_1 \leq t < T$ 时, 等效电路如图 1.3(b) 所示, 回路方程式为

$$0 = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E \quad (1-2)$$

由图 1.2 可见, 开关放大器的输出电压 u_{AB} 是在 0 和 U_D 之间变化的脉冲电压, u_{AB} 的极性不变, 因此这种电路是单极性工作制。

1.2 可逆开关放大器——T 型 开关电路的工作原理

T 型开关电路如图 1.4 所示。

在 $0 \leq t \leq t_1$ 时, BG_1 饱和导通、 BG_2 截止, 电动机的电枢两端加上 $+U_D$ 电压。

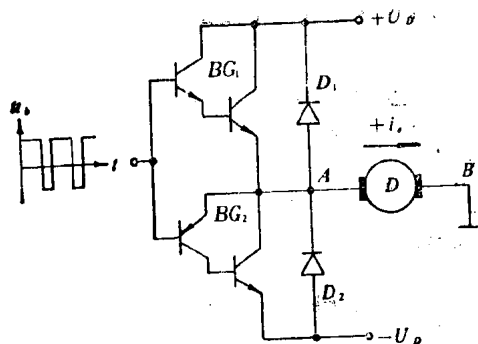
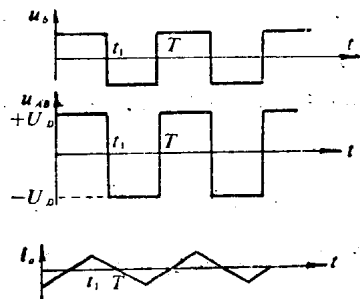
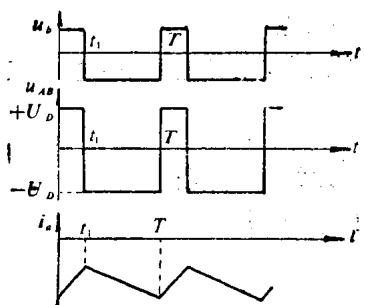


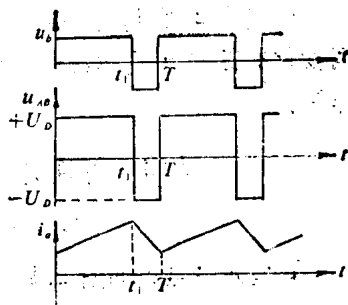
图 1.4 T型双极性开关放大器



(a)



(b)



(c)

图 1.5 T型双极开关电路波形图

在 $t_1 \leq t \leq T$ 时, BG_2 饱和导通、 BG_1 截止, 电动机电枢两端加上 $-U_D$ 电压。当 $t = \frac{T}{2}$ 时, 电枢电压的平均值 $\bar{U}_{AB} = 0$, 电动机不转, 此时电流平均值为零。当 $t_1 < \frac{T}{2}$ 时, $\bar{U}_{AB} < 0$ 、电动机反转, $t_1 > \frac{T}{2}$ 时, $\bar{U}_{AB} > 0$ 、电动机正转, 见图 1.5。 $\bar{U}_{AB}$ 与控制脉冲的宽度成正比, 而脉冲宽度由脉宽调制器的控制电压控制。

改变脉宽调制器控制电压的大小和极性即能调节电动机转速的大小和方向。

当控制电压突然降低时 $\bar{U}_{AB}$ 减小, 但由于电动机的惯性, E 不会立即改变, 此时 $E > \bar{U}_{AB}$ 。如果电动机原来是处于正转情况下(图 1.5(c)), 在一个周期的 $0 \sim t_1$ 时间区间内 BG_2 截止, 由于 $E > \bar{U}_{AB}$, 反向的制动电流经续流二极管 D_1 将能量反输给电源(再生发电制动状态)。

等效电路如图 1.6(a) 所示。

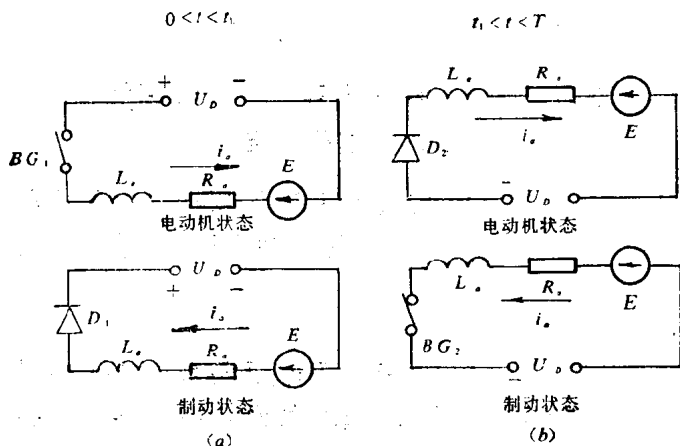


图 1.6 T 型双极性开关放大器等效电路

回路方程式为

$$U_D = L_o \frac{di_a}{dt} + R_o i_a + E \quad (1-3)$$

在一个周期的 $t_2 \sim T$ 区间内, BG_2 饱和导通, 反向制动电流经 BG_2 与电源接通(反接制动状态), 等效电路如图 1.6(b), 回路方程式为

$$-U_D = L_o \frac{di_a}{dt} + R_o i_a + E \quad (1-4)$$

电动机在反转情况下减速时的过程与上述过程相似, 在 $0 \sim t_1$ 区间内, 再生制动电流经 D_2 流通, 而在 $t_1 \sim T$ 区间内, 反接制动电流则经 BG_1 流通。

从以上分析可知, 开关放大器的输出电压是在 $-U_D$ 到 $+U_D$ 之间变化的脉冲电压, 因此这种电路是双极性工作制。双极性工作制输出电流总是连续的, 见图 1.5(a)。

T 型开关电路结构简单, 但主回路需用双电源供电, 且晶体管承受的反向电压较高, 为电源电压的两倍, 因此只适用于低压伺服电机系统。

1.3 可逆开关放大器——H 型开关 电路的工作原理

H 型开关电路由四个三极管和四个二极管构成桥式电路, 这种开关电路有单极性输出、双极性输出和有限单极性输出三种不同的控制方法。

一、单极性输出

单极性输出的控制方法是在 BG_1 、 BG_2 管的基极加相位相反的脉冲控制信号, 在 BG_4 的基极加饱和控制电压, BG_3 的基极加截止控制信号, 如图 1.7(a) 所示。

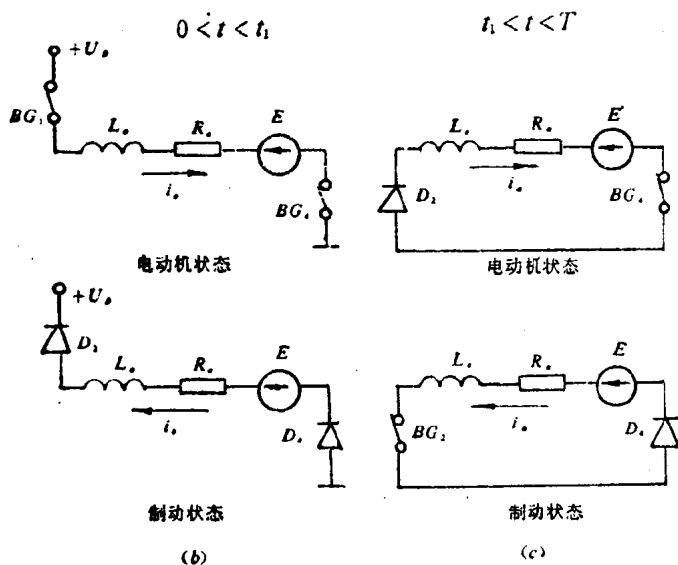
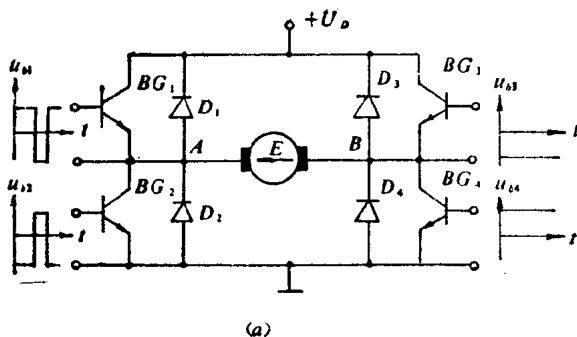


图 1.7 单极性 H 型开关电路

单极性 H 型开关电路电流、电压波形如图 1.8 所示, 在一个周期的 $0 \sim t_1$ 时间区间内, BG_1 饱和导通、 BG_2 截止, 由于 BG_4

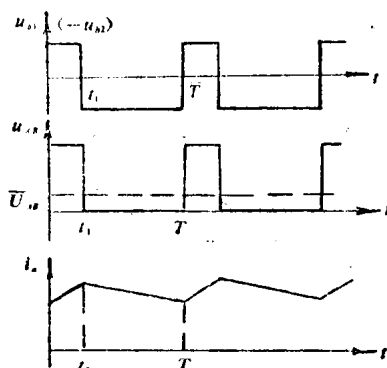


图 1.8 H 型单极性开关电路波形图

始终饱和导通, 因此此时电动机电枢 AB 两端的电压为 $+U_D$, 电枢电流由 $+U_D$ 经 BG_1 、电枢、 BG_4 到电源的负极。等效电路如图 1.7(b) 所示。回路方程式为

$$U_D = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + E \quad (1-5)$$

在一个周期的 $t_1 \sim T$ 时间区间内, BG_1 截止, 这时 BG_2 虽然可以导通, 然而因 BG_3 始终截止, 因此电动机与电源切断, 电枢电流经 BG_4 和续流管 D_2 继续流通, 等效电路如图 1.7(c) 所示, 回路方程式为

$$0 = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + E \quad (1-6)$$

当 BG_3 的基极加饱和控制电压, BG_4 的基极加截止控制电压时, 在一个周期的 $t_1 \sim T$ 区间内, BG_2 和 BG_3 饱和导通, 电源电压 $+U_D$ 加在电枢 BA 两端, 电动机反转, 在 $0 \sim t_1$ 区间内电流经续流二极管 D_1 和三极管 BG_3 继续流通。

在电动机正转时, 控制电压突然降低时 $\bar{U}_{AB} < E$, 在 $t_1 \sim T'$ 区间内, 电枢电流经 BG_2 、 D_4 短路, 形成能耗制动状态, 等效电路如图 1.7(c), 回路方程式同式 (1-6)。在 $0 \sim t_1$ 区间内, 与 $\bar{U}_{AB}$ 反向的制动电流经二极管 D_1 、 D_4 将能量反输给电源 (再生发电制动状态), 等效电路如图 1.7(b), 回路方程式同式 (1-5)。

二、双极性输出

1. 开关放大器输出电压的频率与开关频率相同的控制方式:

电路如图 1.9 所示

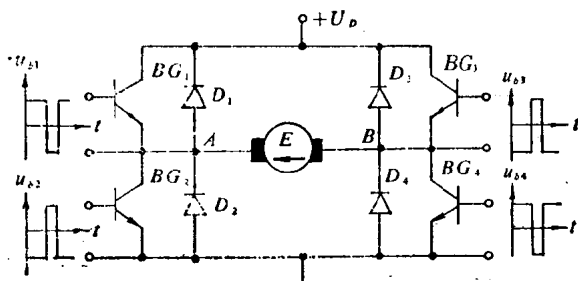


图 1.9 H 型双极性开关放大器

令 $u_{b1} = u_{b4}$, $u_{b2} = u_{b3} = -u_{b1}$ 。

在一个周期内, 当 $0 \leq t < t_1$ 时, BG_1 、 BG_4 导通, $+U_D$ 加在电枢的 AB 两端 ($U_{AB} = U_D$), 当 $t_1 \leq t < T$ 时, BG_2 、 BG_3 导通, $+U_D$ 加在 BA 两端 (即 $U_{AB} = -U_D$), 当 $t_1 > \frac{T}{2}$ 时, 电枢两端的平均电压 $\bar{U}_{AB} > 0$ (图 1.10(b)), 电动机正转。当 $t_1 < \frac{T}{2}$ 时, $\bar{U}_{AB} < 0$ (图 1.10(c)), 电动机反转。当 $t_1 = \frac{T}{2}$ 时, $\bar{U}_{AB} = 0$ (图 1.10(a)), 电动机转速为零。

改变脉宽调制器控制电压的大小及方向即能调节平均电压 $\bar{U}_{AB}$ 的大小和极性, 达到电动机调速的目的, 现以 $t_1 > \frac{T}{2}$ 的情况为例分析电动机的工作状态:

当电机工作在电动机工作状态时, 在一个周期内, 当 $0 \leq t < t_1$ 时, BG_1 、 BG_4 导通, 等效电路如图 1.11(a), 回路方程式

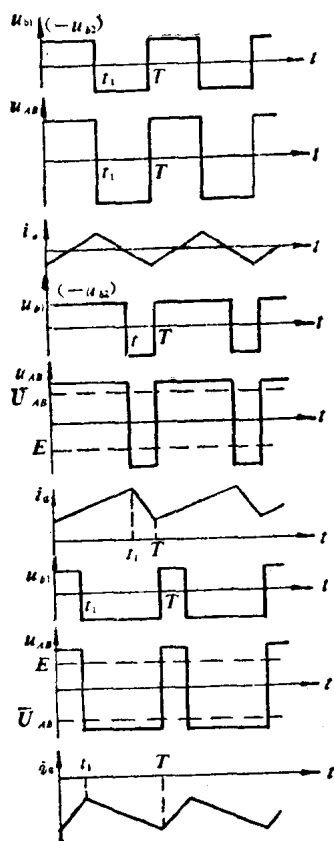
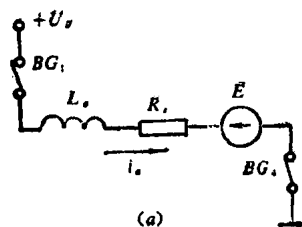
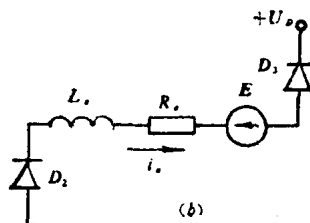


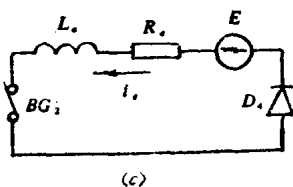
图 1.10 H 型双极性开关
放大器波形图



(a)

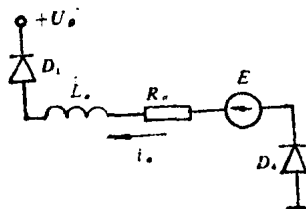


(b)



(c)

(c)



(d)

图 1.11 H 型双极性开关
放大器等效电路