

晶体管脉宽 直流调速系统

王离九 黄锦恩 编著



JINGTIGUAN
MAIKUAN
ZHILIUTIAOSU
XITONG

331.2

华中理工大学出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了晶体管脉宽调速系统的工作原理、特点和设计计算方法。内容包括功率晶体管开关电路的特点；各种晶体管脉宽调制放大器的的工作原理、结构和设计方法，以及它们对直流电动机供电时输出电压电流的分析计算；晶体管直流脉宽调速系统的结构、性能和设计方法等。此外，本书还讨论了由脉宽调制放大器的非线性特性引起系统产生振荡的问题。

本书可供从事电气自动化的科学技术工作者、高等院校及中等专业学校电气自动化和自动控制等专业的师生参考。

晶体管脉宽直流调速系统

王寅九 黄锦恩 编著

责任编辑 殷伯明

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本：850×1168 1/32 印张：7.875 字数：192 000

1988年11月第1版 1988年11月第1次印刷

印数：1-3 000

ISBN 7-5609-0220-0/TN·8

定价：1.32元

前 言

半导体器件制造技术的发展,使晶体管三极管的电压、电流定额逐渐增大,它在交、直流伺服系统中的应用也日益广泛。

本书论述用晶体管脉宽调制放大器对直流电动机供电的直流脉宽调速系统的结构、特性和设计,以及非线性问题。由于晶体管三极管容易控制,开关频率高,开关损耗小,因而晶体管直流脉宽调速系统与可控硅直流调速系统比较有以下优点:

1. 需用的功率元件少,线路简单。例如,在组成可逆式直流脉宽调速系统的H型脉宽调制放大器中只有4个功率三极管,而在组成可逆式可控硅直流调速系统的两个反并联三相全控桥中则需要12个可控硅。此外,三极管的控制也比可控硅容易。这样,就使得晶体管直流脉宽调速系统的线路比可控硅直流调速系统的简单。

2. 晶体管脉宽调制放大器的开关频率一般在1~3千赫之间,而三相可控硅全控桥的开关频率只有300赫。前者的开关频率差不多比后者高一个数量级。这样,晶体管直流脉宽调速系统的频带就可比可控硅直流调速系统宽许多。因此,晶体管直流脉宽调速系统的响应速度和稳速精度等性能指标就都比较好。同时,电枢电流的脉动量减小,且容易连续,不会对电动机转速的平稳性和附加损耗有明显的影晌。

3. 晶体管脉宽调制放大器的电压增益 K ,不随其输出电压的改变而变化;而可控硅交流器的电压增益 K ,在输出电压低时变小,影响可控硅直流调速系统的低速性能。这也是直流脉宽调速系统调速范围作得宽的原因之一。

由于晶体管直流脉宽调速系统的响应快,低速性能好,调速

范围广，效率高等，所以它一出现就受到自动化科技工作者的重视，发展也很快。国外在70年代末已形成系列产品，现正在中等容量范围内取代可控硅直流调速系统而广泛地用于机床等生产机械上。国内在80年代初先后研制成功可逆式和不可逆式晶体管直流脉宽调速系统，并开始推广应用。随着科学技术和工业生产的发展，高、中等工业院校的自动化类专业将增加晶体管脉宽调速方面的教学内容。为适应科研、设计、维修和教学的需要，我们利用收集的国内外有关资料和科研工作中整理的资料编写了这本书。

本书主要供从事电气自动化和自动控制的科技工作者参考，也可以作为高、中等工业院校自动化类专业的教学用书。

本书在编写过程中得到本单位领导的支持、鼓励和许多同志的大力帮助，作者在此谨向这些同志表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中的缺点和错误在所难免，诚恳欢迎读者批评指正。

作 者

1986年9月

目 录

前 言	(1)
第一章 晶体管脉宽调制放大器分析	(1)
§ 1-1 不可逆输出的脉宽调制放大器	(1)
§ 1-2 可逆输出的脉宽调制放大器	(3)
一、H型脉宽调制放大器	(4)
二、T型脉宽调制放大器	(11)
§ 1-3 脉宽调制放大器工作线路举例	(12)
一、不可逆输出脉宽调制放大器的工作线路	(13)
二、双极式脉宽调制放大器的工作线路	(19)
三、单极式脉宽调制放大器的倍频工作线路	(20)
四、T型脉宽调制放大器的工作线路	(26)
五、H型脉宽调制放大器工作线路简图	(27)
第二章 晶体管脉宽调制放大器的设计	(31)
§ 2-1 晶体管的工作特性	(31)
一、二极管的开关特性	(31)
二、三极管的工作特性	(33)
§ 2-2 功率三极管的开关损耗	(48)
一、截止损耗	(48)
二、饱和导通损耗	(48)
三、开关损耗	(48)
四、脉宽调制放大器中的功率损耗	(51)
§ 2-3 脉宽调制放大器的设计	(53)
一、脉宽调制放大器开关频率的确定	(53)
二、三角波振荡器的设计	(55)
三、电压-脉冲变换器的设计	(58)

四、脉冲分配器的设计	(60)
五、功率三极管驱动电路的设计	(63)
六、功率三极管缓冲器的设计	(71)
七、泵升电压限制器的设计	(76)
八、过电流保护电路的设计	(82)
第三章 直流脉宽调速系统开环特性的分析计算 ...	(83)
§ 3-1 不可逆直流脉宽调速系统的分析计算	(83)
一、电枢电压平均值	(83)
二、电枢电流平均值	(85)
三、电枢电流连续时的脉动量和转速脉动量	(85)
四、电枢电流断续时的脉动量和转速脉动量	(91)
五、不可逆脉宽调速系统的机械特性	(99)
§ 3-2 可逆直流脉宽调速系统开环特性的分析 计算	(100)
一、单极式脉宽调制放大器-电动机调速系统	(100)
二、单极受限式脉宽调制放大器-电动机调速系统	(100)
三、双极式脉宽调制放大器-电动机调速系统	(101)
四、可逆脉宽调速系统的机械特性	(104)
§ 3-3 三种可逆直流脉宽调速系统的比较	(105)
一、电枢电流脉动量	(105)
二、电动机的功率损耗	(107)
三、电动机的利用系数	(109)
四、电动机低速运行的平稳性	(111)
第四章 闭环直流脉宽调速系统的分析计算	(114)
§ 4-1 双闭环直流脉宽调速系统的分析	(114)
一、系统的原理图和结构图	(114)
二、系统动态过程的分析	(118)
§ 4-2 自动调速系统的性能指标	(122)
一、稳态性能指标	(123)
二、动态性能指标的定义	(125)
三、动态性能指标的表达式	(130)

§ 4-3 自动调速系统的电子调节器最佳综合法	(141)
一、最佳化概念	(141)
二、二阶最佳控制系统	(143)
三、三阶最佳控制系统	(148)
四、二阶和三阶最佳控制系统的比较	(159)
§ 4-4 双环直流脉宽调速系统的设计	(163)
一、设计原则	(163)
二、设计举例	(165)
三、双环直流脉宽调速系统的特点	(168)
§ 4-5 单闭环直流脉宽调速系统的分析	(169)
一、模拟式单闭环直流脉宽调速系统	(169)
二、数字式单闭环直流脉宽调速系统	(171)
第五章 直流脉宽调速系统的非线性振荡	(175)
§ 5-1 继电自动控制系统的特性方程式	(175)
一、继电自动控制系统的方框图	(175)
二、线性部分的特性方程式	(177)
三、继电元件的特性方程式	(192)
§ 5-2 继电自动控制系统的自激振荡	(197)
一、自激振荡存在的条件	(197)
二、继电控制系统自激振荡的矢量图	(202)
§ 5-3 继电自动控制系统的强制振荡	(222)
一、强制振荡存在的条件	(224)
二、继电控制系统强制振荡的矢量图	(226)
三、继电控制系统的高频振荡线性化	(235)
附 录	(237)

第一章 晶体管脉宽调制放大器分析

本章分析单极性输出和双极性输出晶体管脉宽调制放大器主电路的工作情况，输出电压平均值和占空比的计算方法，并通过三个实例说明单极性输出和双极性输出晶体管脉宽调制放大器的结构、其中各环节的作用及相互关系。

§ 1-1 不可逆输出的脉宽调制放大器

不可逆输出的脉宽调制放大器分为有制动作用和无制动作用两种。

图1-1表示的是有制动作用的不可逆输出脉宽调制放大器的主电路。它由三极管 T_1 、 T_2 与二极管 D_1 、 D_2 组成，三极管 T_1 是主控管，起调制作用， T_2 是辅助管。它们的基极驱动电压

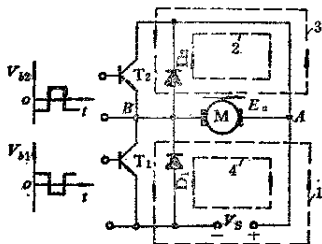


图1-1 有制动作用的不可逆输出脉宽调制放大器的主电路

V_{b1} 和 V_{b2} 是两个极性相反的脉冲电压。

电压 V_{b1} 、 V_{b2} 和电流 i_a 的波形表示在图1-2中。设在 $0 \leq t < t_1$ 期间， V_{b1} 为正， V_{b2} 为负，三极管 T_1 导通， T_2 关断。电源电

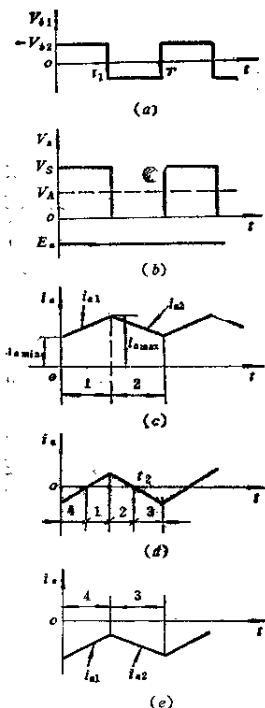


图1-2 有制动作用的单极性输出脉宽调制放大器的电压、电流波形图

电动机进行再生制动，而在 $t_1 \leq t < T$ 期间电枢电流 i_a 则沿回路3从B点流向A点，电动机转为能耗制动。电枢电流 i_a 的近似变化曲线表示在图1-2(e)中。

压 V_a 经 T_1 加在电动机电枢上。在 $V_a > E_s$ 的情况下，电流 i_a 沿回路1从A点流向B点，数值逐渐增大，电动机工作在电动状态。

在 $t_1 \leq t < T$ 期间， V_{a1} 为负， V_{a2} 为正。三极管 T_1 关断，切断电动机的电源回路，电枢电感 L_a 中的自感电势维持电流 i_a 沿回路2继续流动，电动机仍工作在电动状态。这时 V_{a2} 虽为正，但二极管 D_2 的正向压降限制 T_2 不能导通。若在 $t = T$ 时，电流 $i_a \geq 0$ ， D_2 中一直有电流，那么 T_2 始终不会导通。电枢电流 i_a 的近似变化曲线表示在图1-2(e)中。

若电枢电流 i_a 在 t_1 到 T 期间的 t_2 时刻衰减到零，那么在 t_2 到 T 期间反电势 E_s 使三极管 T_2 导通，电枢电流 i_a 沿回路3反向流动，电动机进行能耗制动。电流 i_a 的近似变化曲线见图1-2(d)。

电动机在增减速或位能负载力矩驱动下工作时，它的反电势 E_s 将大于电源电压 V_s ，即 $E_s > V_s$ 。在 $0 < t < t_1$ 期间电枢电流 i_a 沿回路4从B点流向A点，

通常定义脉宽调制放大器输出电压的平均值 V_A 与电源电压 V_s 之比为负载电压系数 ρ

$$\rho = \frac{V_A}{V_s} \quad (1-1)$$

定义主控三极管的开通时间 t_1 与开关周期 T 之比为脉宽调制放大器的占空比 γ ,

$$\gamma = \frac{t_1}{T} \quad (1-2)$$

由于这种脉宽调制放大器的平均电压 V_A 与主控三极管的开通时间 t_1 成比例,因此若当主控管的开通时间等于开关周期 T 时,输出电压的平均值就等于 V_s ,那么负载电压系数 ρ 和占空比 γ 的数值是相等的,即

$$\rho = \gamma = \frac{t_1}{T} \quad (1-3)$$

去掉图1-1中的三极管 T_2 ,就变成了无制动作用的不可逆输出的脉宽调制放大器。

§1-2 可逆输出的脉宽调制放大器

可逆输出的脉宽调制放大器的主电路结构有H型和T型两

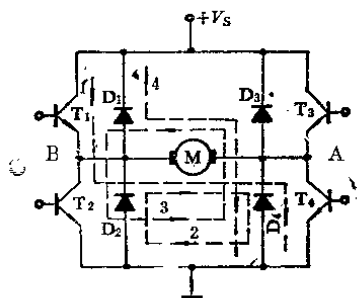


图1-3 单极式脉宽调制放大器的主电路

程。H型脉宽放大器又分为单极式、单极受限式和双极式三种。下面将逐一地进行分析论述。

一、H型脉宽调制放大器

1. 单极式脉宽调制放大器

单极式脉宽调制放大器的主电路（见图1-3）是由四个三极管 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 以及四个二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 组成的桥型电路。在电桥的一个对角线中接电源电压 V_s ，在另一对角线中接电动机 M 。单极受限式和双极式脉宽调制放大器主电路的结构和图1-3所示相同，只是这三种脉宽调制放大器中各三极管的开关情况不同而已。

可逆输出的脉宽调制放大器输出电压 V_A 的极性是随着控制电压 V_c 的极性改变的。单极式脉宽调制放大器在控制电压 V_c 的极性为正时三极管 T_1 和 T_2 交替地导通和关断， T_3 一直关断， T_4 一直导通。当控制电压 V_c 的极性变负时，三极管基极电压 V_{b1} 和 V_{b3} 对换， V_{b2} 和 V_{b4} 对换。

设在 $0 \leq t < t_1$ 期间 V_{b1} 为正， V_{b2} 为负，如图1-4(a)所示，若 $V_{b1} > E$ ，那么电枢电流 i_a 沿回路1（经 T_1 和 T_4 ）从 B 流向 A ，电动机工作在电动状态。在 $t_1 \leq t < T$ 期间， V_{b1} 为负， V_{b2} 为正， T_1 关断并切断电动机的电源回路，电感 L 维持电流 i_a 沿回路2（经 T_4 和 D_2 ）继续流动，电动机仍工作在电动状态。电枢电压 V_a 和电枢电流 i_a 的近似波形表示在图1-4(b)和(c)中。在这种情况下， V_{b2} 虽然为正，但二极管 D_2 的正向压降限制 T_2 导通。

假如在 $t_1 \leq t < T$ 期间的某一时刻 t_2 ，电流 i_a 衰减到零，那么在 $t_2 \leq t < T$ 期间电动机的反电势 E 将使三极管 T_2 导通，电枢电流 i_a 沿回路3从 A 流向 B ，电动机进行能耗制动，电枢电流 i_a 的波形见图1-4(d)。

当 $E > V_s$ 时，在 $0 \leq t < t_1$ 期间，电枢电流 i_a 经回路4（经 D_1 、电源和 D_4 ）从 A 流向 B ，电动机进行再生制动；在 $t_1 \leq t < T$ 期

间, 电流 i_a 沿回路3(经 T_2 和 D_1)从 A 流向 B , 电动机进行能耗制动。电枢电流 i_a 的变化曲线见图1-4(e)。

由图1-4(b)中电压 V_a 的波形看出, 当控制电压 V_c 为正时, 这种脉宽调制放大器只输出正的脉冲电压。同样, 当控制电压 V_c 为负时, 它只输出负的脉冲电压。由于在一种控制电压 V_c 的作用下, 这种脉宽调制放大器只输出一种极性的脉冲电压, 因而把它叫做单极式脉宽调制放大器。

在正控制电压 V_c 的作用下, 单极式脉宽调制放大器的工作情况和输出电压 V_a 的波形都和单极性输出的脉宽调制放大器的相同。所以这种脉宽调制放大器的负载电压系数 ρ 仍可按式(1-1)计算, 即

$$\rho = \frac{V_A}{V_s},$$

式中, 输出电压的平均值 V_A 可为正, 可为负, 因而负载电压系数 ρ 的值在 $-1 \sim 0 \sim +1$ 之间变化, 它的绝对值和占空比 γ 相等, 即

$$\gamma = |\rho| = \frac{t_1}{T} \quad (1-4)$$

2. 单极受限式脉宽调制放大器

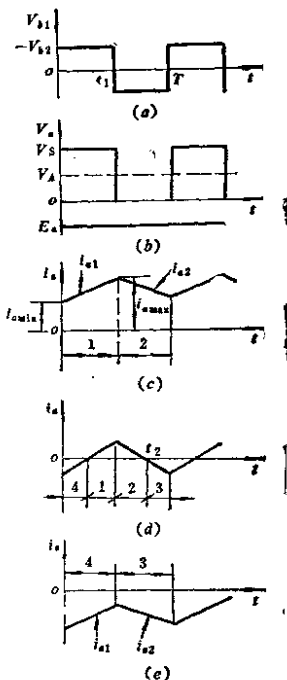


图1-4 单极式脉宽调制放大器输出电压 V_a 和电流 i_a 的波形

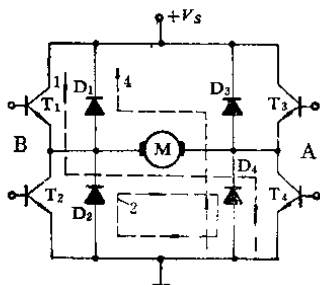


图1-5 单极受限式脉宽调制放大器的主电路

单极受限式脉宽调制放大器的主电路与单极式脉宽调制放大器的相同（见图1-5）。但是，三极管 T_2 的开关情况不一样。在

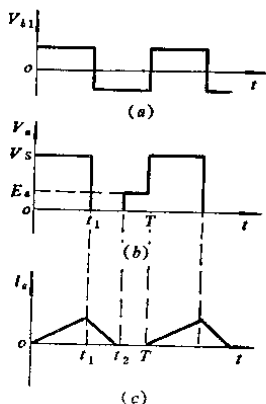


图1-6 单极受限式脉宽调制放大器输出电压 V_a 和电流 i_a 的波形

单极式脉宽调制放大器中三极管 T_2 和 T_1 交替地导通和关断。在单极受限式脉宽调制放大器中 T_2 一直是关断的。这样就排除了电动机进行能耗制动的可能，因而在 $t_1 \leq t < T$ 期间，电流 i_a 断续（见图1-6(c)），从而使单极受限式脉宽调制放大器的外特性变软，降低了系统的控制精度。假如电枢电流 i_a 始终都大于零的话，那么单极受限式脉宽调制放大器的工作情况和性能是一样的。

在电流连续区和断续区内脉

宽调制放大器的占空比不变，仍按式1-2计算。在电流断续区，电枢电压不等于零而等于 E 。（见图1-6(b)），使得输出电压的平均值 V_A 升高，

$$V_A = \rho V_s + \frac{T-t_2}{T} E, \quad ,$$

令 $E \simeq V_A$ ，则 $V_A \simeq \rho \left(\frac{T}{t_2} \right) V_s = \rho' V_s$ 。

由此求出新的负载电压系数

$$\rho' = \frac{T}{t_2} \rho. \quad (1-5)$$

由于 $T \geq t_2$ ，因此 $\rho' \geq \rho$ 。但是 ρ' 的值仍在 $-1 \sim +1$ 之间变化。

综上所述，受限单极式与单极式脉宽调制放大器的区别是：受限单极式脉宽调制放大器中三极管 T_2 是关断的，它与 T_1 发生对通的可能性小，控制的可靠性高；在单极受限式脉宽调制放大器中电枢电流 i_a 可能断续，并使它的外特性变软，系统的控制精度降低。

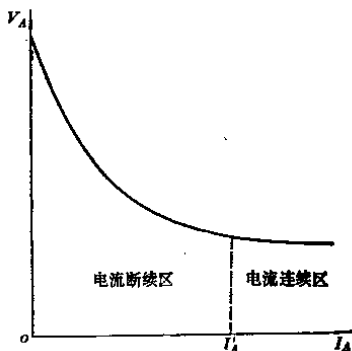


图1-7 受限单极式脉宽调制放大器的外特性曲线

3. 双极式脉宽调制放大器

双极式脉宽调制放大器的主电路见图1-8。四个三极管分为两组， T_1 和 T_4 为一组， T_2 和 T_3 为一组。同一组中的两个三极管同时导通，同时关断，两组三极管之间是交替地导通和关断的。

控制电压 V_c 为正时各三极管基极电压的波形见图1-9。

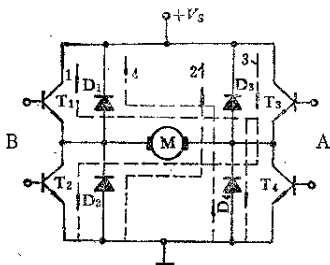


图1-8 双极式脉宽调制放大器的主电路

在 $0 \leq t < t_1$ 期间， V_{c1} 和 V_{c4} 为正，三极管 T_1 和 T_4 导通， V_{c2} 和 V_{c3} 为负， T_2 和 T_3 关断。当 $V_c > E_c$ 时，电枢电流 i_a 沿回路1（经 T_1 和 T_4 ）从B流向A，电动机工作在电动状态。

在 $t_1 \leq t < T$ 期间， V_{c1} 和 V_{c4} 为负， V_{c2} 和 V_{c3} 为正， T_1 和 T_4 关断；在电枢电感作用下，电枢电流 i_a 沿回路2（经 D_2 和 D_3 ）继续从B流向A，电动机仍然工作在电动状态。受 D_2 和 D_3 正向压降的限制， T_2 和 T_3 不能导通。假若在 $t = t_2$ 时正向电流 i_a 衰减到零，那么在 $t_2 < t \leq T$ 期间，三极管 T_2 和 T_3 在电源电压 V_c 和反电势 E_c 的作用下导通，电枢电流 i_a 沿回路3（经 T_2 和 T_3 ）从A流向B，电动机工作在反接制动状态。在 $T < t \leq (T + t_1)$ 期间，三极管的基极电压改变极性， T_2 和 T_3 关断，电枢电感 L_a 维持电流 i_a 沿回路4（经 D_1 和 D_4 ）继续从A流向B，电动机工作在制动状态。假若在 $t = t_3$ 时，反向电流 $(-i_a)$ 衰减到零，那么在 $T + t_1 < t \leq T + t_2$ 期间，电源电压 V_c 使三极管 T_1 和 T_4 导通，电枢电流 i_a

又沿回路1 (经 T_1 和 T_4) 从 B 流向 A , 电动机工作在电动状态。电枢电流波形见图1-9(d)。若电动机的负载重, 电枢电流 i_a 大且在工作过程中不会改变方向的话, 那么电动机始终都工作在电动状态。

当 $E_s > V_s$ (位能负载或增磁减速) 时, 在 $0 \leq t < t_1$ 期间, 电流 i_a 沿回路4 (经 D_1 和 D_4) 从 A 流向 B , 电动机工作在再生制动状态; 在 $t_1 \leq t < T$ 期间, 电流 i_a 沿回路3 (经 T_2 和 T_3) 从 A 流向 B , 电动机工作在反接制动状态。

由上可知, 电动机不论工作在什么状态, 在 $0 \leq t < t_1$ 期间电枢电压 V 总是等于 $+V_s$, 而在 $t_1 \leq t < T$ 期间总是等于 $-V_s$, 如图1-9(c)所示。电枢电压 V_a 的平均值 V_A 等于正脉冲电压平均值 V_{A1} 和负脉冲电压平均值 V_{A2} 之差, 即

$$\begin{aligned} V_A &= V_{A1} - V_{A2} = \frac{t_1}{T} V_s - \frac{(T-t_1)}{T} V_s \\ &= \left(2\frac{t_1}{T} - 1\right) V_s \end{aligned} \quad (1-6)$$

由式(1-6)得双极式脉宽调制放大器的负载电压系数

$$\rho = \frac{V_A}{V_s} = 2\frac{t_1}{T} - 1 \quad (1-7)$$

将式(1-7)代入式(1-6)得:

$$V_A = \rho V_s \quad (1-8)$$

式(1-7)和式(1-8)表明, 当 $t_1 = T/2$ 时, $\rho = 0$, $V_A = 0$ 。这说

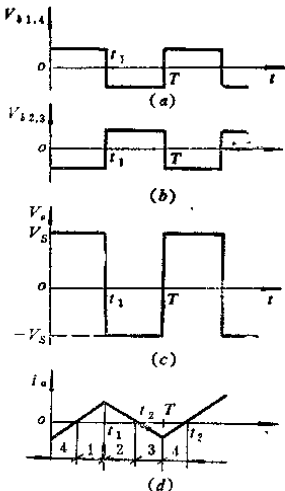


图1-9 双极式放大器输出电压和电流的波形

明，当电动机停止不动时，电枢电压 V_a 的瞬时值不等于零，而正、负脉冲电压的宽度相等，因而电动机停止不动时，电枢回路中流过一个交变的电流 i_a ，见图1-9(d)中的波形。这个电流一方面增大了电动机的空载损耗，但另一方面它使电动机发生高频微振，可以减小静摩擦，起到动力润滑作用。

由式(1-7)看出，双极式脉宽调制放大器的负载电压系数 ρ 的值也是在 $-1 \sim 0 \sim +1$ 之间变化的，这种脉宽调制放大器的占空比，仍可用主控管的开通时间 t_1 与开关周期 T 之比计算，即 $\rho = t_1/T$ 。

双极式脉宽调制放大器与单极式脉宽调制放大器的区别是：

(1)双极式脉宽调制放大器输出电压平均值等于零时，电动机不转，但电枢回路中流过一个交变电流，这个电流增加了电动机的空载损耗，但它能使电动机发生高频微振，起到动力润滑作用。单极式脉宽调制放大器输出电压的平均值等于零时，其瞬时值也等于零，因而，电动机停止不动时，电枢回路中没有电流，减小了电动机的空载损耗，但没有动力润滑作用。

(2)双极式脉宽调制放大器输出电压平均值小时，每一个三极管的脉冲驱动电压 V_g 仍然较宽，能保证三极管可靠地导通，不会影响电动机低速运转的平稳性。单极式脉宽调制放大器输出电压平均值小时，三极管的脉冲驱动电压 V_g 变窄，窄到一定数值后，就不能保证三极管可靠地导通了，从而影响电动机低速运转的平稳性。因此由单极式脉宽调制放大器组成的调速系统的低速性能不如由双极式脉宽调制放大器组成的调速系统的低速性能。

(3)双极式脉宽调制放大器中四个三极管在工作过程中一般都工作在开关状态，开关损耗大；而在单极式脉宽调制放大器中一般只有一个（或两个）三极管，工作在开关状态，开关损耗要小一些。

三种可逆输出的脉宽调制放大器中各三极管的开关情况，输