

直流变换器的原理和设计

Zhiliu Bianhuanqi de Yuanli he Sheji

王 鸿 麟 编 译
人 民 邮 电 出 版 社

直流变换器的原理和设计

王鸿麟 编译

人民邮电出版社

内 容 提 要

本书根据英文版《电子设备的电源供给》(Power Supplies for Electronic Equipment, 1973年版, 作者 J. R. Nowicki) 的第一卷第四章和第二卷第三、四章编译而成, 主要介绍各种直流变换器(包括逆变器)的工作原理和设计方法。在翻译过程中, 对逆变器的工作原理作了一些简要的补充, 并增编了可控硅三相逆变器等节。

本书可供从事设计和使用半导体电源设备的工人和技术人员作参考。

直流变换器的原理和设计

王鸿麟 编译

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

北京东长安街27号

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ 1978年5月第一版

印张: $6 \frac{16}{32}$ 页数: 104 1978年5月北京第一次印刷

字数: 148千字 印数: 1-28,000册

统一书号: 15045·总2212-有584

定价: 0.55元

编译者的话

半导体直流变换器是一种比较先进的电源设备，可以作为各种电子设备和电气设备的电源，可以作为加热和熔炼各种金属的中频电源，也可以用来实现各种机械设备的变频调速，还可以作为各种设备的静止式备用交流电源。

目前，我国许多方面都在推广和应用直流变换器，广大工人和技术人员希望更多地了解半导体直流变换器的工作原理和设计方法。遵照毛主席“洋为中用”的教导，根据英文版《电子设备的电源供给》(Power Supplies for Electronic Equipment, 1973年版，作者 J. R. Nowicki) 的第一卷第四章和第二卷第三、四章编译了这本书。在翻译过程中，为了便于广大读者阅读，对逆变器的工作原理作了一些简要的补充，还根据国内实际情况，增编了一些内容（如可控硅三相逆变器等）。

本书较为全面地介绍了各类直流变换器的工作原理和设计方法，并且还列举了设计实例，可供从事直流变换器设计和运用的广大工人和技术人员参考。

本书承北京邮电学院通信电力专业审校，提出了不少宝贵意见，在此表示感谢。由于本人水平有限，书中缺点和错误在所难免，希广大读者批评指正。

编译者

1977年5月

目 录

引 言	1
一、直流变换器的作用和组成	1
二、直流变换器的分类和特点	2
三、直流变换器的基本工作原理	3
第一章 晶体管单管直流变换器	5
第一节 电感储能式直流变换器	5
一、电感储能式振荡电路工作原理	5
二、电感储能式直流变换器工作原理	8
三、电感储能式直流变换器的设计	11
四、电感储能式直流变换器启动和保护电路	17
五、其他的电感储能式直流变换器电路	19
第二节 变压器耦合式直流变换器	22
一、变压器耦合电路工作原理	22
二、变压器耦合式单管直流变换器	30
第二章 推挽式晶体管直流变换器	37
第一节 推挽式饱和变压器直流变换器	40
一、电路工作原理	40
二、启动电路及其计算	42
三、饱和变压器的设计	48
四、具有过流保护的推挽式饱和变压器逆变器	54
五、推挽式饱和变压器直流变换器一般评价	62
第二节 推挽式双变压器直流变换器	64
一、电路工作原理	64
二、电路的设计	67
三、实际电路的设计及其性能	71

四、其他实例	82
第三节 CR 定时推挽式直流变换器	91
一、工作原理	92
二、设计步骤	93
三、实例	97
第四节 LR 和 LC 定时推挽式逆变器	107
第三章 桥式晶体管逆变器	110
第一节 饱和变压器桥式逆变器	110
一、启动电路及其计算	111
二、电路工作原理	113
第二节 不饱和输出变压器桥式逆变器	115
一、双变压器桥式逆变器	115
二、 CR 定时桥式逆变器	117
三、 LR 和 LC 定时桥式逆变器	118
第四章 可控硅逆变器	120
第一节 可控硅特性	120
第二节 可控硅并联逆变器	124
一、可控硅并联逆变器的基本电路	124
二、具有反馈二极管的可控硅并联逆变器	126
三、可控硅并联逆变器的效率	140
第三节 高频可控硅逆变器	148
一、可控硅并联逆变器的高频工作	148
二、元件数值的计算	149
三、器件的选择	150
四、高频逆变器的效率	151
五、实际电路	151
第四节 可控硅三相逆变器	153
一、串联电感式可控硅三相逆变器	154
二、串联二极管式可控硅三相逆变器	169

三、用二相可控硅逆变器输出三相交流电压	172
第五章 其它类型的直流变换器	174
第一节 隧道二极管直流变换器	174
一、隧道二极管特性	174
二、单管隧道二极管直流变换器	175
三、推挽式隧道二极管直流变换器	177
第二节 晶体管三相逆变器	177
一、三个单相逆变器同步输出三相交流电压	178
二、他激式三相 RC 振荡器逆变器	179
三、三相平衡的自激振荡器逆变器	179
第三节 静止式正弦波逆变器和静止式备用交流电源	185
一、静止式正弦波逆变器	186
二、静止式备用交流电源	192
附录一 本书所用国外铁氧体磁芯主要参数表	198
附录二 本书所用国外半导体器件主要参数表	200
附录三 英国线规 (s. w. g.) 漆包线与公制直径对照表	201

引 言

一、直流变换器的作用和组成

电源设备是各种电子设备和电气设备的重要组成部分。各种电气设备一般都由 110 伏、220 伏单相交流电源或 380 伏三相交流电源供电，有些电气设备还需要由可变频率的交流电源供电。在某些情况下，交流电气设备要由电池供电时，可以采用直流-交流变换器（通常称为逆变器），将直流电压变换为方形波交流电压。如果用电设备需要正弦波交流电源时，可以通过滤波器滤去方形波中的谐波分量。电气设备由电池供电时，电源供给方框图如图 0-1 所示。

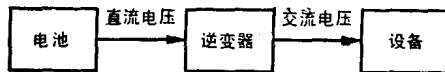


图 0-1 电气设备由电池供电时，电源供给方框图

如果电气设备要由可变频率的交流电源供电时，可以采用交流-直流-交流变换器（通常称为变频器），首先通过整流把交流变换为直流，然后再通过逆变器把直流变换为频率可变的交流电。变频器方框图如图 0-2 所示。

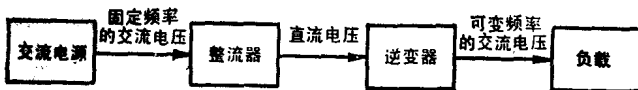


图 0-2 变频器方框图

一般电子设备都由整流器和蓄电池供电。但各种设备需要的电源电压大不相同。比如：各种通信设备所需的电源电压就

有 6 V、12 V、24 V、60 V、110 V、130 V 和 220 V 等。由于各种设备需要的电源电压不同，因此，这些设备由电池供电时，势必造成蓄电池组种类繁多，规格不齐，体积庞大，维护不便。如果采用直流变换器，把低压直流变换成高压直流，那么就可省去高压蓄电池组，这样就减少了蓄电池的组数，减轻了蓄电池的维护工作量。

直流变换器是一种直流电压变换设备。首先通过逆变器把直流电压变换成方形波交流电压，然后通过整流再将交流电压变换为所需的直流电压。直流变换器方框图如图 0-3 所示。

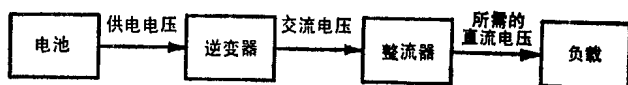


图 0-3 直流变换器方框图

从变频器和直流变换器的方框图中，可以看出，在逆变器的前面加入整流器，就组成了交流变频器；在逆变器的后面加入整流器就组成了直流变换器。整流器的原理和设计方法已有许多书籍进行了分析。本书主要介绍各种逆变器的基本工作原理和一般的设计方法。

二、直流变换器的分类和特点

把直流变换为交流的方法有很多种。可以采用振动机换流器和旋转换流器，也可以采用电子逆变器。由于振动机换流器和旋转换流器机械损耗和电能损耗较大，效率很低，所以目前很少采用。电子逆变器具有效率高、体积小、重量轻等优点，因此特别适用于小型移动式电子设备。另外电子逆变器中，没有活动的机械触点，消除了机械换流器所具有的接点和换向器的磨损，也消除了接点跳火现象，因此维护工作量较小，寿命

显著提高，同时也大大减少了对通信设备的干扰。

电子直流变换器的种类很多。根据电子逆变器采用的电子器件不同，可以分为晶体管直流变换器、可控硅直流变换器、隧道二极管直流变换器等。根据所采用的逆变器电路不同，晶体管直流变换器又可分为单管变换器、推挽变换器和桥式变换器。根据输出的交流电压的相数，也可以分为单相逆变器和三相逆变器。

三、直流变换器的基本工作原理

所有电子逆变器都是利用电子器件作为断续器控制直流电源通断，然后再通过变压器把直流变换为交流。在晶体管直流变换器中，晶体管有时工作于饱和状态，有时又转换为截止状态，这样就使直流电源电流有时导通，有时中断。这种断续的电流流过变压器的初级线圈，在变压器的次级线圈两端就能得到交流输出电压。变压器输出的交流电压经过整流后又变换为所需数值的直流电压。

直流变换器的作用主要是变换电压。因此对变换器的主要要求是工作可靠和效率高。由于弛张振荡器比正弦波振荡器效率高，所以直流变换器的逆变器通常都采用弛张振荡器，尤其是晶体管弛张振荡器更适用。

由于晶体管处于截止或饱和状态时，损耗功率很小，而处于不饱和的导通状态时，损耗功率较大，所以在自激弛张振荡器中，晶体管的基-射电路内应加入足够的正反馈，以保证晶体管导通后很快达到饱和状态。晶体管一旦离开饱和状态，应马上转入截止状态，以避免晶体管工作于导通但不饱和的状态。因为，在这种工作状态下，晶体管功率损耗较大。另外，由于晶体管饱和时，内阻很小。因此，为了减小晶体管的功率损耗，在工作周期中，晶体管导通时间应尽可能长些，峰值电

流与平均电流之比应尽可能小些。

由于可控硅具有正向压降小，关断时间短，额定正向电流很大等特点，所以也很适于作为电子逆变器的断续器，通过触发脉冲控制可控硅的导通和关断，就能够将直流变换为交流。如果电子设备由太阳电池或温差电池供电时，由于电池电压很低，不能采用晶体管和可控硅逆变器。在这种情况下，可以采用隧道二极管逆变器。这种逆变器是利用隧道二极管的负阻特性作成振荡器，通过振荡器把直流变换为交流。隧道二极管逆变器功率很小，一般仅为毫瓦级。

第一章 晶体管单管直流变换器

第一节 电感储能式直流变换器

一、电感储能式振荡电路工作原理

在电感储能式振荡电路中，电源接通期间，电池供给的能量以磁能的形式储存在电感线圈中，不传输能量。电源断开期间，电感线圈中储存的能量传输到输出电路。电源断开后，电感储能式振荡电路中电压和电流波形如图 1-1 所示。为了说明

电压和电流之间的相位关系，图中电源断开后时间标度适当放大了一些。

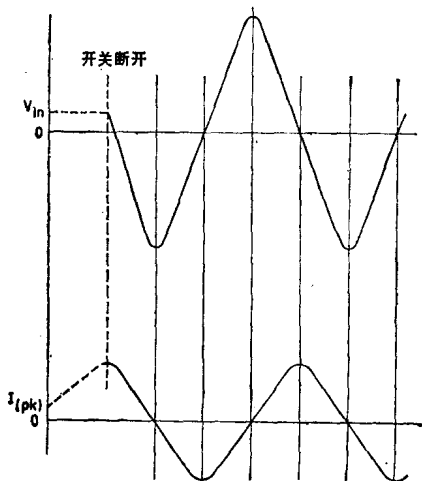


图 1-1 电源断开后电压和电流波形

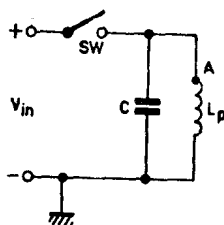


图 1-2 电感储能振荡电路

1. 电源接通期间电感线圈内的储能

最简单的电感储能振荡电路如图 1-2 所示，假设开关 SW

为理想的断续器，交替地接通和断开。开关与直流输入电源串联，当开关接通时，直流输入电压 V_{in} 加到电感线圈 L_P 两端，线圈中产生电流 i_L 。电感线圈中的电流 i_L 与两端电压 V_L 的关系是：

$$V_L = L_P \frac{di_L}{dt}$$

$$i_L = \frac{1}{L_P} \int_0^t V_L dt$$

当 $V_L = V_{in}$ 时，电感线圈中的电流为：

$$i_L = \frac{V_{in}}{L_P} t + I_0$$

式中 I_0 为电感线圈中的初始电流，若 $I_0 = 0$ 或数值很小可以忽略时，则

$$i_L = \frac{V_{in}}{L_P} t \quad (1-1)$$

由上式可以看出，电感线圈中的电流是线性增长的。经过时间 t_1 以后，电感线圈中的电流 $i_{PK} = (V_{in}/L_P)t_1$ 。此时，电感线圈中储存的能量 E_S 可由下式给出：

$$E_S = \frac{1}{2} L_P i_{PK}^2 = \frac{1}{2} \frac{V_{in}^2}{L_P} t_1^2 \quad (1-2)$$

由于线圈中储存的能量完全是由电池供给的，因此该能量也可以表示为：

$$E_S = V_{in} I_{av} t_1 = \frac{1}{2} V_{in} i_{PK} t_1 \quad (1-3)$$

式中 I_{av} 是从 $t=0$ 到 t_1 这段时间内电池输出的平均电流。

2. 电源断开期间产生的能量交换

如果在时间 t_1 时开关断开，流过电感线圈的电流不能马上

中断。如果线圈的储能没有释放回路，那么开关断开后，原来流过电感线圈的电流 i_{PK} 将向线圈的分布电容充电。由于 A 点的电压很快朝负方向变化，流过线圈的电流开始减小，当线圈储存的全部磁场能量释放完毕后，电流减小到零。此时，电容器两端的电压上升到 V_{PK} 伏，线圈储存的磁场能量全部转换为电容器储存的电场能量，即 $\frac{1}{2} CV_{PK}^2 = \frac{1}{2} L P i_{PK}^2$ 。然后，电

容器通过电感线圈放电，反方向流过线圈的电流开始上升，当电容器两端的电压下降到零时，该电流达到最大值，即 $-i_{PK}$ ；此时电场能量又全部转换为磁场能量。

在理想情况下，电容器和电感线圈之间的能量交换过程将一直持续下去，形成正弦振荡，电压和电流波形如图 1-1 所示。实际上，由于电路中总是有损耗的，所以振荡振幅将逐渐衰减，并且最后停止振荡。这种振荡称为电感储能式振荡。振荡周期为 $2\pi(LC)^{\frac{1}{2}}$ 。

3. 电感储能线圈的能量输出。

如图 1-3 所示，当电阻和大容量电容器并联组成的负载电路通过二极管接到电感储能式振荡电路时，一旦二极管导通，电感线圈产生的电感储能式振荡就马上停止。

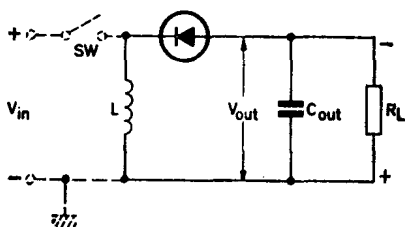


图 1-3 通过二极管接入输出电容器和负载的电感储能式振荡电路

假设电容器 C_{out} 原来充电到负电压 V_{out} (譬如说，由于上一个工作周期充电的结果)，这样，当开关断开时，电感线圈两端的电压急速地正向跃变，一旦上升到 V_{out} ，电压正向跃变

停止，电流从电感线圈流入电容器，如果电容器的容量足够大，以致充电过程中电容器两端的电压基本上不变，那么电流将以 $di/dt = V_{out}/L$ 的速率下降，从原来接近于 i_{PK} 下降到 $i_{PK} - (V_{out}/L)t$ ，经过时间 t_2 以后，这个线性下降的电流减小到零， t_2 可由下式给出：

$$t_2 = \frac{L P i_{PK}}{V_{out}} \quad (1-4)$$

此时，电感线圈储存的能量全部传输到输出电路，二极管截止。

如果经过时间 t_2 以后，开关重新闭合，上述过程重复发生，周期为 $t_1 + t_2$ 秒。

电池每秒钟供出的能量为 $\frac{1}{2} V_{in} i_{PK} t_1 / (t_1 + t_2)$ ，如果该能量全部传输到输出电路，那么输出电压可由下式给出：

$$\frac{V_{out}}{R_L} = \frac{V_{in} i_{PK} t_1}{2(t_1 + t_2)} \quad (1-5)$$

因为周期地馈送到输出电容器的能量，将逐步地损耗在负载电阻中，这样，负载的大小将影响输出电压，所以输出电压与负载电阻有关。

当所需要的输出电压高于开关元件所允许的最高电压时，输出二极管必须接到电感线圈的附加绕组或者单独的绕组上，这样开关元件两端的电压只是输出电压 V_{out} 的一部分。

电感储能变换器和变压器耦合变换器的一个基本差别在于输出电压是负载的函数。

二、电感储能式直流变换器工作原理

电感储能式变换器的基本电路如图 1-4 所示。图中晶体管

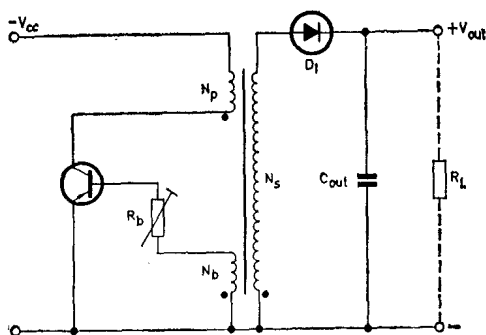


图 1-4 基本的电感储能直流变换器电路

代替了电感储能振荡电路中的开关。

根据图 1-4, 介绍电感储能式直流变换器的工作原理。假设电源接通后, 晶体管导通。集极电流流过变压器初级线圈, 由于初级线圈 N_p 和基极线圈 N_b 之间的耦合作用, 基极线圈中将产生感应电压, 该电压使晶体管基极电流增加, 基极电流增加使集极电流进一步增加, 基极线圈感应电压也进一步增加, 这就形成了一个强烈的正反馈过程, 使晶体管很快地由内阻很高的截止状态变为内阻很低的饱和状态。但是, 由于这是一个突变过程, 在这个过程中, 变压器的初级线圈表现出的阻抗很大, 晶体管饱和时的集极电流仍很小, 此时晶体管的工作点为图 1-5 中的 b 点。因此晶体管的损耗很小。

晶体管导通期间是饱和的, 因此实际上, 全部输入电压都加在变压器初级线圈两端, 流过晶体管和变压器初级线圈的电流线性上升。由于初级线圈的电压约等于 V_{cc} , 所以基极线圈两端的电压为 $V_{cc}(N_b/N_p)$ 。这个固定不变的基极电压产生不变的基极电流 I_B 。这时晶体管的工作状态是沿着图 1-5 中 I_B 不变的一根曲线, 由 b 点移动到 a 点。

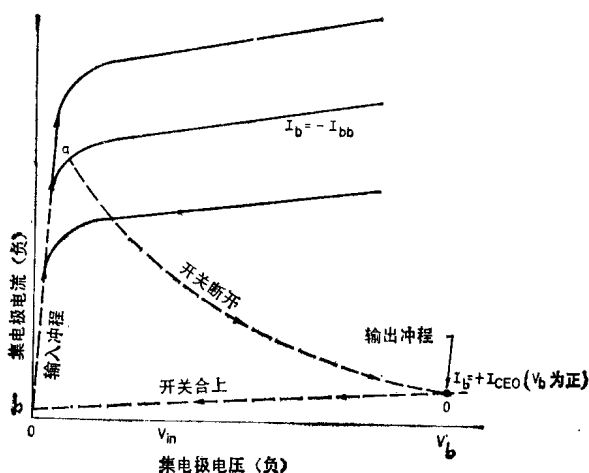


图 1-5 晶体管工作点的轨迹

晶体管集极电流一直上升到 $h_{FE}I_B$ ，其中 h_{FE} 是晶体管的大信号电流增益。此时，晶体管退出饱和区，开始向截止状态转换，集极电压上升，变压器初级线圈两端的电压下降，基极电流开始减小，集极电流也随之减小，因此所有线圈两端的电压反向，这又是一个正反馈过程，晶体管很快截止。晶体管的工作点变为图 1-5 中的 0 点，并暂时停留在 0 点。

在晶体管截止期间，由于电感储能电路开始产生振荡，反向电压很快上升，当次级电压上升到等于输出电压时，反向电压停止上升。这时二极管 D_1 导通，晶体管导通期间储存在初级线圈 L_P 中的能量，开始向电容器传输。当输出电流下降到零时，二极管不再导通。线圈上的剩余电压等于电感线圈两端的输出电压。然后电感线圈的分布电容放电，在电感线圈中产生反向电流，因此基极线圈中产生反向感应电压，使晶体管重新导通。此时工作点又变到图 1-5 中的 b 点。