

# 稳压电源设计

王顺祺 编

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书主要介绍各种稳压电源的工作原理和设计方法，并对常见的各种稳压、稳流电路进行了分析。

全书共分五章，分别为整流滤波电路、并联调整式和串联调整式稳压稳流电路、晶体管直流变换器与可控硅逆变器以及集成稳压电源等。

为便于读者使用，在每部分内容中，均列出了设计步骤和计算公式，有的还给出了设计示例和实际电路。在书中和书末还选编了电源设计中常用的材料和器件的主要参数或曲线。

本书可供从事电源设计、制造和使用的技术人员和工人阅读，也可供高等学校和中等专业学校有关专业的师生参考。

## 稳 压 电 源 设 计

王 顺 祺 编

\*

国 防 工 业 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

河北涿中印刷厂印刷

\*

850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张 10<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 265千字

1983年10月第一版 1983年10月第一次印刷 印数：00,001—14,000册

统一书号：15034·2547 定价：1.30元

# 目 录

第一章 整流滤波电路 .....	1
第一节 整流元件 .....	1
一、半导体二极管 .....	1
二、其他整流元件 .....	4
第二节 单相整流电路 .....	5
一、纯阻负载整流电路 .....	5
二、感性负载整流电路 .....	13
三、容性负载整流电路 .....	19
四、倍压整流电路 .....	27
第三节 三相整流电路 .....	33
一、电路形式 .....	34
二、多相电路的理想化分析 .....	38
三、三相电路与单相电路的比较 .....	41
四、三相电路中的损耗 .....	43
第四节 电源滤波器 .....	44
一、电感滤波器 .....	47
二、电容滤波器 .....	48
三、电感电容 ( $\Gamma$ 型) 滤波器 .....	50
四、 $\pi$ 型滤波器 .....	55
五、RC 滤波器 .....	56
六、几种滤波电路的比较 .....	58
第五节 整流电路中的变压器 .....	59
一、电阻负载整流器中的变压器 .....	60
二、感性负载整流电路中的变压器 .....	65
三、容性负载整流电路中的变压器 .....	66
四、变压器的内阻 .....	69
五、变压器和滤波抗流圈的体积 .....	70
第六节 整流滤波器设计 .....	71
一、电路方案的选择 .....	72
二、感性负载整流器的计算步骤 .....	75
三、容性负载整流器的计算步骤 .....	81

<b>第二章 并联调整式晶体管稳压电源</b> .....	88
<b>第一节 硅稳压管稳压电路</b> .....	90
一、硅稳压管的工作特性 .....	90
二、硅稳压管稳压电路 .....	92
三、硅稳压管稳压电路的设计 .....	94
<b>第二节 晶体管并联调整稳压电路</b> .....	97
一、单管并联稳压电路 .....	97
二、复合管并联稳压电路 .....	103
三、采用差动放大器的并联稳压电路 .....	106
四、晶体管并联稳压电路的设计 .....	108
<b>第三节 高稳定度基准电源</b> .....	114
一、化学标准电池 .....	114
二、半导体基准电源 .....	114
三、由两级稳压器组成的基准电压电路 .....	117
四、高稳定度二次标准电压源 .....	118
五、采用温度补偿型稳压管的稳压电路 .....	119
六、带恒流源的基准稳压电路 .....	121
七、采用场效应管的基准稳压电路 .....	123
<b>第三章 串联调整式晶体管稳压电源</b> .....	124
<b>第一节 串联调整式晶体管稳压电路的原理</b> .....	124
一、最简单的串联调整式稳压电路 .....	124
二、带有误差放大器的串联调整稳压电路 .....	125
三、串联调整稳压电路的稳压性能 .....	128
四、采用复合晶体管的串联调整稳压电路 .....	132
<b>第二节 提高电源稳定性能的几种电路</b> .....	134
一、带前置稳压器的稳压电路 .....	134
二、带辅助电源的稳压电路 .....	136
三、放大管采用恒流源作负载的稳压电路 .....	137
四、采用场效应管的稳压电路 .....	139
五、采用恒流二极管的稳压电路 .....	141
六、采用补偿法的稳压电路 .....	142
七、采用差动放大器的稳压电路 .....	144
八、差放发射极有恒流源的稳压电路 .....	150
九、恒流源作差放负载的稳压电路 .....	151
<b>第三节 几种有特殊要求的串联稳压电路</b> .....	153
一、高压串联稳压电路 .....	154
二、输出电压可调至零的稳压电路 .....	155
三、集电极输出型串联稳压电路 .....	156

四、宽范围调压的串联大功率稳压电路 .....	159
第四节 串联调整稳压器的保护电路 .....	162
一、限流型保护电路 .....	163
二、截止型保护电路 .....	166
第五节 串联调整稳压电路的设计 .....	171
一、稳压电路各部分的基本设计内容 .....	172
二、设计示例 .....	180
三、稳压电源的结构设计和调试 .....	190
第六节 稳流电源 .....	200
一、参数稳流电路 .....	201
二、带反馈控制的稳流电路 .....	207
第七节 几种实际的串联稳压电源 .....	209
一、20V/1A 稳压电源 .....	209
二、宽范围调压的稳压电源 .....	210
三、24V/2A 精密稳压电源 .....	213
第四章 直流变换器 .....	214
第一节 概述 .....	214
一、直流变换器的特点和应用范围 .....	214
二、直流变换器的分类 .....	216
第二节 单管式晶体管变换器 .....	217
一、反接式单管变换器 .....	219
二、正接式单管变换器 .....	231
第三节 推挽式晶体管变换器 .....	233
一、共发射极推挽式晶体管变换器的工作原理 .....	233
二、推挽式晶体管变换器的几种型式 .....	238
三、共发射极推挽式晶体管变换器的设计 .....	239
四、推挽式晶体管变换器的辅助电路 .....	254
五、推挽式变换器的输出特性 .....	258
六、变压器线圈的分布电容和漏感 .....	261
七、推挽式变换器的实际电路 .....	267
第四节 他激式变换器 .....	270
一、带功率放大级的晶体管变换器 .....	271
二、双变压器式推挽变换器 .....	275
第五节 可控硅逆变器 .....	283
一、可控硅并联逆变器 .....	284
二、可控硅串联逆变器 .....	288

<b>第五章 集成稳压电源</b> .....	297
<b>第一节 混合集成稳压电源</b> .....	297
一、通用混合集成稳压电源 .....	298
二、采用辅助电源的集成稳压电源 .....	300
<b>第二节 半导体集成稳压电源</b> .....	302
一、WA-724系列集成稳压电源 .....	303
二、WB-724系列集成稳压电源 .....	305
<b>附表 1 2CZ51~2CZ60 型硅半导体整流二极管的</b> 主要参数 .....	308
<b>附表 2 2CW50~2CW149 型硅半导体稳压</b> 二极管的主要参数 .....	309
<b>附表 3 2DW50~2DW146 型硅半导体稳压</b> 二极管的主要参数 .....	311
<b>附表 4 2DW230~2DW236 型硅平面温度补偿稳压</b> 二极管的主要参数 .....	313
<b>附表 5 3DG 型 NPN 硅外延平面高频小功率</b> 三极管的主要参数 .....	314
<b>附表 6 3DG 型 NPN 硅平面小功率高反压</b> 三极管的主要参数 .....	315
<b>附表 7 3DG 型 NPN 硅外延平面小功率高反压</b> 三极管的主要参数 .....	316
<b>附表 8 3CG 型 PNP 硅平面高频小功率三极管的</b> 主要参数 .....	318
<b>附表 9 3DD 型 NPN 硅合金扩散低频大功率</b> 三极管的主要参数 .....	319
<b>附表 10 3DD 型 NPN 硅外延平面低频大功率</b> 三极管的主要参数 .....	320
<b>附表 11 3DD 型 NPN 硅低频高反压大功率</b> 三极管的主要参数 .....	321

附表12	3AX型PNP锗合金低频小功率 三极管的主要参数 .....	322
附表13	3AD型PNP锗低频大功率 三极管的主要参数 .....	323
附表14	3CT型NPN可控硅整流元件的主要参数 .....	324
附图1~附图11	.....	325

# 第一章 整流滤波电路

## 第一节 整流元件

把交流电转变成直流电，一般有两种方法：一是机械变换法。它是用电动发电机组把交流电能先转变为机械能，再由机械能带动直流发电机发出直流电。二是利用单向导电元件(整流元件)实现从交流电至直流电的转换。这就是我们常说的“整流”。“整流”按工作特性可把“整流”分为不可控整流和可控整流两类。前者如半导体二极管、真空二极管、硒整流器等，它们的共同特点是具有单方向导电的性能，但在这些整流元件上没有控制电极，后者则要在整流元件上加上控制电极来调节导电角的大小，以达到预定的目的，例如可控硅和闸流管整流。本章只讨论在直流电源中应用最广的不可控整流器的原理和设计。

### 一、半导体二极管

半导体二极管是目前最常用的整流元件。它具有单方向导电的特性，即某一方向的电阻比另一方向的电阻大许多倍。例如，一个锗二极管，当加上正向电压时，开始正向电流比较小，当加至 $0.2\sim 0.4\text{V}$ （对于硅管为 $0.6\sim 0.8\text{V}$ ）时，电流显著地增长。而在二极管上加一个反向电压时，其反向电流很小。小功率锗整流二极管一般反向电流为几十至几百微安，硅管则只有几个微安。当反向电压加至某一数值时，反向电流突然增大。这一电压，称为二极管的反向击穿电压。

硅二极管的典型伏安特性曲线如图 1-1 所示。



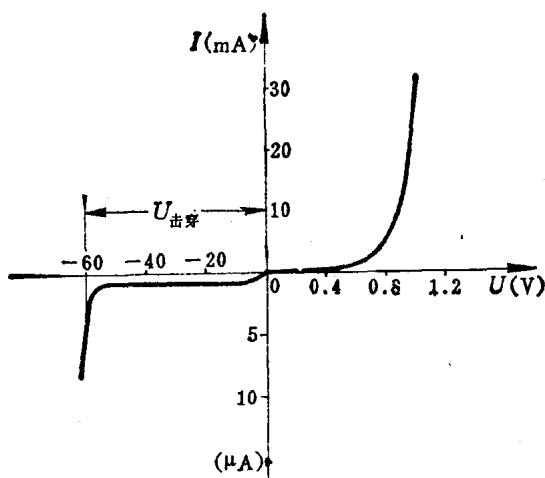


图1-1 硅二极管的伏安特性曲线

目前在整流电路中已经大量采用了半导体二极管。这种整流元件的工作原理和特性,其他有关书中均有介绍,这里不再重复。

作为整流元件的二极管应该具有以下特性:

- (1) 最大整流电流要大,即允许通过较大的直流电流。
- (2) 反向击穿电压要高,这样可以得到较高的整流电压。
- (3) 正向电阻要小,即在一定的整流电流下正向压降较小,以减少整流元件本身的损耗。
- (4) 反向电流要小,反向电流越小整流特性就越理想。另外,反向电流小也就减少了整流元件的损耗。

在电子设备中,常用的半导体整流二极管的主要参数见附表1。

在选用半导体整流二极管时,需注意以下几个问题:

- (1) 表中所列的正向电流(最大整流电流),一般均指在一定的工作温度下整流电流的平均值。当环境温度高于规定的工作温度时,其允许最大整流电流值应相应降低。例如,2CP21~27型二极管允许通过的整流电流与环境温度的关系,如图1-2所示。

从图中可看到，当环境温度超过50°C时，曲线直线下降。所以在选择整流管时，应根据该型号整流管的特性曲线核对其允许整流电流值。

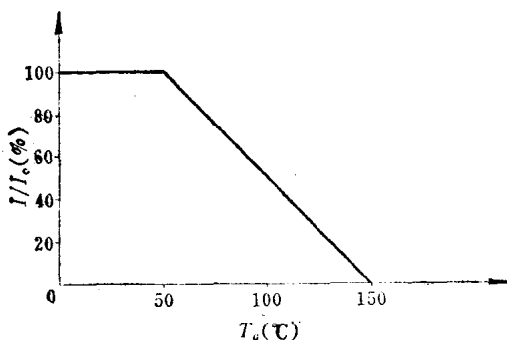


图1-2 2CP21~27的  $\frac{I}{I_o}$  与环境温度的关系曲线

当整流器为容性负载时，由于其整流电流的波形是脉动的，电流有效值增高，所以在这种电路中，整流管允许的整流电流平均值也应降低。在以下各节中我们将详细讨论这一问题。

(2) 参数表中所列的正向压降，一般是指在最大整流电流时的压降。当实际整流电流低于规定值时，正向压降小于表中所列的数值。同样，在参数表中所给的反向电流也是指规定温度下，在最高反向工作电压时的反向电流。

以上两个参数都与器件的温度有关。当器件本身的温度升高时，正向压降减小，反向电流增大。它们的变化可按下列指数规律估算：

$$I = I_s \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right)$$

式中  $q$ ——电子电荷量 ( $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ )；

$T$ ——绝对温度；

$k$ ——玻耳兹曼常数 ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )；

$I_s$ ——反向饱和电流。

(3) 在参数表中对于每种整流管都规定了最高工作频率值。当使用频率超过此值以后，二极管的动态特性变坏，整流效率降低，损耗加大。所以在使用时一般不应超过这个数值。这在一般作为市电 ( $f = 50\text{Hz}$ ) 整流的器件来说是无需考虑的，但在采用变换器式稳压电路时（这时整流元件的工作频率一般为几千赫至几十千赫）就应注意了。在本书第四章将专门讨论这一问题。

(4) 整流电流超过1A的整流二极管，在使用时应按规定加上散热板或型材散热器。否则会引起整流管的结温升高，甚至烧毁。关于散热器的选择方法将在第三章讨论。

## 二、其他整流元件

在电子设备中，除了上面讨论的半导体整流二极管外，还有一些其他类型的整流元件。例如，真空二极管就是曾在电子管电路中常见的整流元件。

真空二极管是在一个抽真空的玻璃壳内装有两个电极，一个是阳极，另一个是阴极。阳极与阴极之间加上整流电压。当阴极被灯丝加热以后，表面即放射电子。当阳极电压相对于阴极为正时，阴极发射的电子被阳极电场所吸引，形成整流电流。当阳极电压相对于阴极为负时，阳极电场排斥从阴极发射出的电子，不产生电子流（严格地讲含有数值极小的反向电流）。这样就形成了单方向的导电特性。真空二极管的正向电阻一般比较大，约为数百欧姆。

由于真空二极管在使用时还需要单独的灯丝电源，并且内阻较大，工作时温度较高。与半导体二极管相比，使用不方便。所以随着半导体器件的发展，目前在电子设备中使用真空二极管作为整流元件的已经比较少了。

硒整流器也具有单方向导电特性。在五十年代及以前的电子设备中，曾经采用过这种元件。这种整流元件的结构比较复杂，而且正向电流密度只有  $50\text{mA}/\text{cm}^2$ ，所以用作整流器件时，体积

较大。另外这种元件的反向电流比较大，每平方厘米达数毫安。而且正向电阻也较大，在额定负载时正向压降一般在1V以上，每片容许的反向电压值一般只有20V左右，在较高电压下使用时需要很多片叠起来，占用了很大的体积。因此，近来在电子设备中已很少采用。

此外，在仪表中有时还用到氧化铜整流器，在大功率整流设备中还有水银整流器等等。这些装置，在电子设备中已很少遇到，因此本书不予讨论。

## 第二节 单相整流电路

单相整流电路，是在单相交流电网中利用整流二极管的单方向导电特性将交流电变成直流电的电路。由于整流电路中的交流电压与直流电压之间的关系随整流电路后面所接的负载特性而改变，所以我们对各种负载的整流电路分别加以讨论。

### 一、纯阻负载整流电路

#### (一) 半波整流电路

半波整流电路如图1-3所示。图中 $B_y$ 为电源变压器，利用变压器将电网电压变为所需要的电压 $U_2$ 。 $D$ 是整流元件， $R_L$ 是负载电阻。

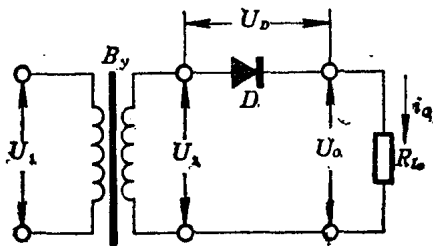


图1-3 半波整流电路

电路接通以后，各部分的电流、电压波形如图1-4所示。

$u_2$ 为变压器次级线圈的电压，其波形一般与电源电压波形相

同，为正弦波。在正半周时，二极管  $D$  导电，负载电阻  $R_L$  上有电流  $i_o$  流过。因而在  $R_L$  上产生电压降  $u_o$ ， $u_o$  与  $i_o$  相位相同，其值为  $u_o = i_o R_L$ 。在二极管  $D$  上也产生一个数值较小的正向压降，其值决定于二极管的正向特性。这个正向压降很小，对半导体二极管来说常常在  $1V$  以下，一般对此可以忽略。这两部分电压的瞬时值之和即等于变压器次级线圈上的电压  $u_2$ 。

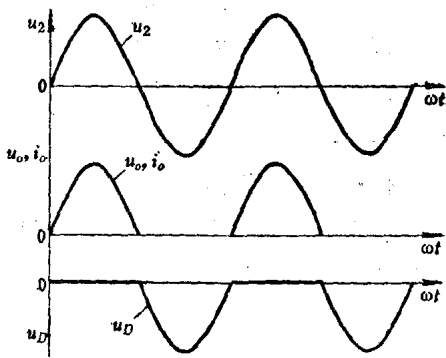


图1-4 半波整流电路的电压、电流波形

当  $u_2$  为负半周时，二极管处在反向工作状态，电流很小，一般在微安数量级，可以忽略。所以在负载电阻  $R_L$  上没有电流流过，因此没有电压降。全部次级线圈电压都加在二极管  $D$  上。因此，在负载  $R_L$  上的电压便形成一系列的脉动电压，如图 1-4 所示。负载  $R_L$  上的脉动电压平均值可用下述方法求出：

$$u_o = U_{2m} \cdot \sin \omega t$$

式中  $U_{2m}$ ——正弦电压的峰值。

$$U_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_o d\omega t = \frac{U_{2m}}{\pi} \quad (1-1)$$

变压器次级线圈电压有效值

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}}$$

将上式代入式 (1-1) 中则有

$$U_o = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} \approx 0.45 U_2 \quad (1-2)$$

流过整流管  $D$  的平均电流  $I_o$  为：

$$I_o = \frac{U_o}{R_L} \approx 0.45 \frac{U_2}{R_L} \quad (1-3)$$

流过变压器次级线圈的电流有效值  $I_2$  为:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_{2m}^2 \sin^2 \omega t d\omega t} = \frac{1}{2} I_{2m} = \frac{1}{2} \frac{U_{2m}}{R_L} \approx 1.57 I_o \quad (1-4)$$

需要注意的是由于在电路中接入了单向导电元件, 形成了半周导电、半周截止的状态。以致有效值与平均值之比 (即波形系数) 已经不再是正弦波中的 1.11 倍了。

在负半周, 电路不导电, 在整流二极管  $D$  上的反向电压

$$U_K = U_{2m} = \sqrt{2} U_2 \approx 3.14 U_o$$

以上几个关系式, 在半波整流器计算中, 会经常遇到。

**例** 已知  $U_o = 30V$ ,  $I_o = 0.2A$ , 计算一电阻性负载整流器的变压器参数。

**解** 根据式 (1-2), 求变压器次级线圈电压  $U_2$ ,

$$U_2 = \frac{U_o}{0.45} = \frac{30V}{0.45} = 67V$$

根据式 (1-4) 求变压器次级线圈电流  $I_2$ ,

$$I_2 = 1.57 I_o = 0.314A$$

该变压器的规格应为  $220V/67V$ 、 $0.314A$ 。

应该指出, 在电子设备中的实际整流器, 一般带有电感或电容滤波器。这时整流电压和电流的关系就不能再用上面的公式计算了。具体计算方法, 将在以下各节中讨论。

## (二) 全波整流电路

全波整流电路如图 1-5 所示。图中变压器次级线圈上有一个中心抽头, 两半边的圈数相等, 即  $U_{21} = U_{22}$ , 但对于中心点来说两电压  $U_{21}$  和  $U_{22}$  是反相的。全波整流电路中各点的波形如图 1-6 所示。

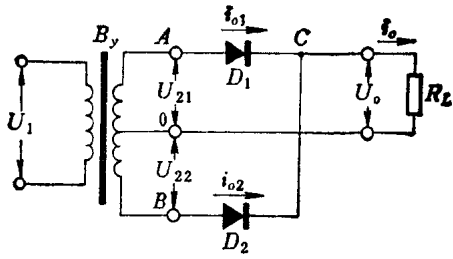


图1-5 全波整流电路

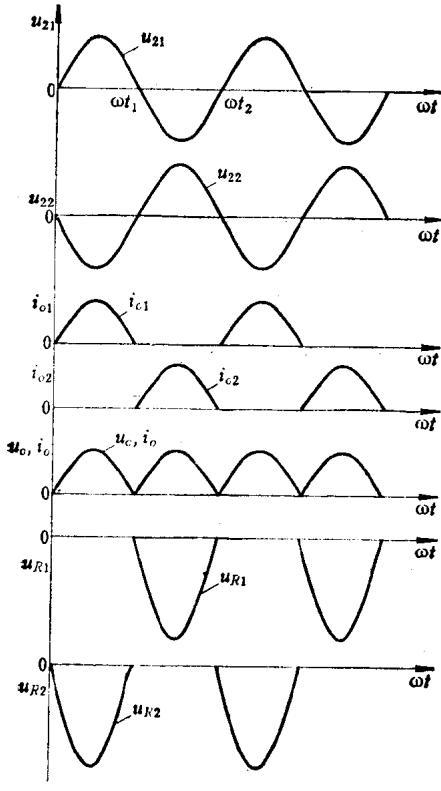


图1-6 全波整流电路的电压、电流波形

在正半周内 (即  $0 \sim \omega t_1$  的时间内) 设图 1-5 中的  $A$  端为正、 $B$  端为负。此时二极管  $D_1$  导电,  $D_2$  截止。负载中的电流  $i_o$  即是  $D_1$  中的电流  $i_{o1}$ , 这个电流的方向是从变压器线圈  $A$  端流出, 经二极管  $D_1$  至  $C$  点, 流过负载电阻  $R_L$  后返回  $0$  点。在负半周, 即  $\omega t_1 \sim \omega t_2$  的时间内, 变压器次级线圈的  $B$  端为正、 $A$  端为负。 $D_2$  导电,  $D_1$  截止。电流由  $B$  点流出经  $D_2$  至  $C$  点, 流经负载电阻  $R_L$  后回  $0$  点。在这半周中, 流经负载  $R_L$  的电流  $i_o$  即是  $D_2$  中的电流  $i_{o2}$ 。从图中可以看出, 流经负载电阻  $R_L$  的电流  $i_{o1}$  和  $i_{o2}$  是同方向的, 都是从  $C$  点经负载  $R_L$  回至  $0$  点。所以在两半周内都有电流通过。负载中的总电流

$$i_o = i_{o1} + i_{o2} \quad (1-5)$$

从图 1-6 可以看出, 全波整流电路实际上是两个半波整流电路的组合。所以可根据半波整流电路中各电压电流的关系, 求出全波整流电路中的电压电流值。

流过整流二极管  $D_1$  和  $D_2$  上的电流平均值与半波整流电路相同, 根据式 (1-3) 可得出

$$I_{o1} = I_{o2} = 0.45 \frac{U_2}{R_L} \quad (1-6)$$

流过负载电阻  $R_L$  的电流平均值

$$I_o = I_{o1} + I_{o2} = 2I_{o1} = 0.9 \frac{U_2}{R_L} \quad (1-7)$$

负载电阻  $R_L$  上的直流电压  $U_o$  为半波整流电路的二倍, 根据式 (1-2) 可得出

$$U_o = 2 \times 0.45U_2 = 0.9U_2 \quad (1-8)$$

变压器次级线圈中电流的有效值

$$I_2 = 1.57I_{o1} = 0.79I_o \quad (1-9)$$

下面我们来讨论整流管上的反向电压  $U_R$ 。

当  $D_2$  导电时,  $D_1$  截止。由于导电的二极管正向电阻很小, 所以对应的电压降也很小。图 1-5 中  $C$  点的电位可以近似地认为



与B点电位相同,这时加在 $D_1$ 上的电压实际上就是AB两点的电压。其最大值为

$$U_R = U_{2.1m} + U_{2.2m} = 2U_{2m} \quad (1-10)$$

式中 $U_{2.1m}$ 和 $U_{2.2m}$ 分别为 $U_{2.1}$ 和 $U_{2.2}$ 的峰值。由于两组线圈是对称的,故可用 $U_{2m}$ 代表 $U_{2.1m}$ 或 $U_{2.2m}$ ,上式也可用变压器次级线圈的电压有效值表示,根据电工基础可知 $U_{2m} = \sqrt{2}U_2$ ,则上式可改写为

$$U_R = 2\sqrt{2}U_2 = 2.82U_2 \quad (1-11)$$

因此,在全波整流电路中,每个二极管所承受的最大反向电压,比半波电路增加了一倍。同时在变压器的次级线圈中还要增加一个中心抽头。由下文可知,这不但增加了制造上的麻烦,还将会增大变压器的体积。因此,在实际应用中经常采用另外一种全波整流电路——桥式电路。

### (三) 桥式整流电路

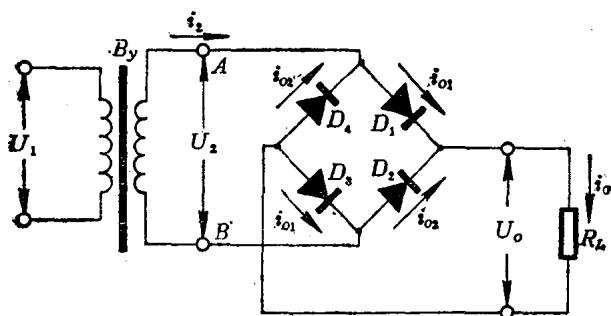


图1-7 桥式整流电路

图1-7所示的桥式整流电路,是由四个二极管组成。整流电路中电压、电流波形如图1-8所示。

在 $0 \sim \omega t_1$ 的时间内,变压器次级线圈A点电压为正,B点为负。这时整流管 $D_1$ 和 $D_3$ 因处在正向工作状态而导电, $D_2$ 和 $D_4$ 截止。电流的流通方向是从A点 $\rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_3 \rightarrow B$ 点;在 $\omega t_1 \sim$