



第3章

直流稳压电源设计

3.1 概述

直流稳压电源将交流电网电压转换成直流电压,为电子系统提供工作电源,是各种电子系统的重要组成部分。直流稳压电源的基本组成如图 3-1-1 所示,由变压器、整流电路、滤波电路、稳压电路几部分组成。

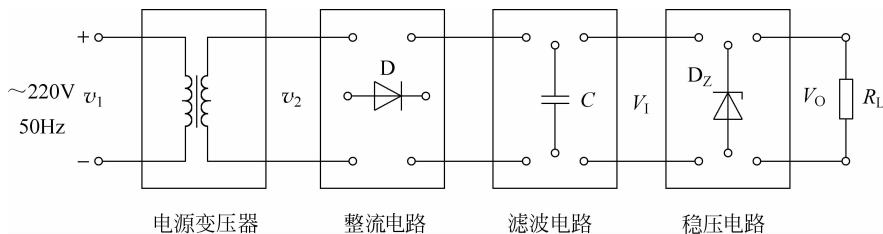


图 3-1-1 直流稳压电源的组成

整流电路的功能是利用二极管的单向导电性,将正弦交流电压转换成单向脉动电压。常见的整流电路有半波整流、全波整流和桥式整流几种类型。

滤波电路的作用是滤除整流电压中的纹波。常用的滤波电路有电容滤波电路、电感电容滤波电路、 Π 型滤波电路等。

稳压电路是直流稳压电源中最关键的一部分,它的性能好坏对整个电源的影响很大。常用的稳压电路有四种类型:并联型稳压电路、串联型稳压电路、线性集成稳压电路和开关型集成稳压电路。并联型稳压电路和串联型稳压电路属于分立元件构成的稳压电路,体积大、成本高、使用不方便。线性集成稳压电路和开关型集成稳压电路采用了集成稳压器,很好地克服了前两种稳压电路的缺点。线性集成稳压电路最常用的是三端固定式集成稳压器,如 7800 系列和 7900 系列等。7800 系列和 7900 系列集成稳压电器只有输入端、输出端和公共端三

个引脚,从而使设计和应用都得到了极大简化。为了使稳压电源的输出电压可调,又推出了可调式三端线性集成稳压器,如 LM317、LM337 等。可调式集成稳压器只需要外接两只电阻即可在相当大的范围内调节输出电压。20 世纪 80 年代后期出现了多功能的开关集成稳压器,如 MC34063 等。开关集成稳压器不但效率高,而且能方便地实现降压、升压和反转极性等多种功能。

直流稳压电源主要有以下技术指标:

(1) 最大输出电流

指稳压电源在正常工作情况下能输出的最大电流,用 $I_{O,\max}$ 表示。稳压电源正常工作时的工作电流 $I_O < I_{O,\max}$ 。为了防止 $I_O > I_{O,\max}$ 时或输出与地短路时损坏稳压电源,稳压电源应设有过流保护电路。

(2) 输出电压

稳压电源正常工作时的输出电压值,用 V_O 表示。

输出电压和输出电流是稳压电源最主要的参数,它们可以采用图 3-1-2 所示的测试电路来测量。测试方法是:先将滑线变阻器 R_L 设为最大值,电压表测得的电压值即为 V_O 。逐渐减小 R_L ,直到 V_O 的值下降 5%,此时电流表测得的电流即为 $I_{O,\max}$ 。注意,测得 $I_{O,\max}$ 值后,应迅速增大 R_L ,以免稳压电源功耗过大。

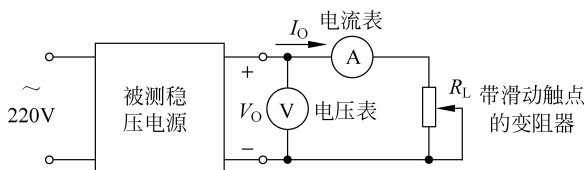


图 3-1-2 $I_{O,\max}$ 和 V_O 测量电路

(3) 纹波电压

纹波电压指叠加在 V_O 上的交流分量,其峰-峰值 $\Delta V_{O,p-p}$ 一般为 mV 级。通常采用示波器观测纹波电压峰-峰值,也可用交流电压表测量其有效值。

(4) 电压调整率和负载调整率

理想稳压电源输出电压应是恒定不变的,但实际上稳压电源的输出电压受交流电网电压波动、负载的变化、温度的变化等因素影响。通常用电压调整率和负载调整率两个参数来表示稳压电源输出电压受输入电压、负载的影响程度。

电压调整率是指在负载和温度恒定的条件下,输入电压变化时,引起输出电压的相对变化,即

$$S_V = \frac{\Delta V_O / V_O}{\Delta V_I} \times 100\% \quad (3-1-1)$$

S_V 表示 V_I 变化时能够维持 V_O 基本不变的能力,直接反映了稳压电源的稳压特性,是一个非常重要的技术指标。有时也以输出电压和输入电压的相对变化之比来表征稳压性能,称为稳压系数,其定义可写为

$$\lambda = \frac{\Delta V_O / V_O}{\Delta V_I / V_I} \times 100\% \quad (3-1-2)$$

负载调整率是指负载电流从零变到最大时,输出电压的相对变化,即

$$S_1 = \frac{\Delta V_o}{V_o} \times 100\% \quad (3-1-3)$$

(5) 输出电阻

在输入电压不变的情况下,输出电流的变化 ΔI_o 引起输出电压的变化 ΔV_o ,其表达式为

$$R_o = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_o} \quad (3-1-4)$$

R_o 的大小表示稳压电路带负载能力的强弱。 R_o 越小带负载能力越强。

3.2 固定式线性直流稳压电源设计

线性直流稳压电源的特点是:输出电压比输入电压低,输出纹波较小,工作产生的噪声低;但发热量大、效率较低、体积大。在电子系统设计中,线性直流稳压电源常常用于模拟系统的稳压电源。本节内容通过一个实例介绍线性直流稳压电源的电路组成、主要元件参数计算。

例 3-2-1 设计一线性直流稳压电源,要求输出 $\pm 5V$ 的直流电压,输出电流 I_o 为 1A。假设交流输入电压为 220V、50Hz,电压波动范围 $+10\% \sim -10\%$ 。

解 线性直流稳压电源原理图如图 3-2-1 所示。TR 为电源变压器,次级线圈带中间抽头。B1 为四只二极管组成的桥式整流电路。 C_1 、 C_4 、 C_5 、 C_8 为滤波电容, C_2 、 C_3 、 C_6 、 C_7 用于旁路高频干扰脉冲及改善纹波。稳压电路采用三端固定式集成稳压器, F_1 和 F_2 为熔断器,起到过流保护作用,实际电路中可选用 PTC 自恢复熔断丝。LED1、LED2 为电源指示二极管。

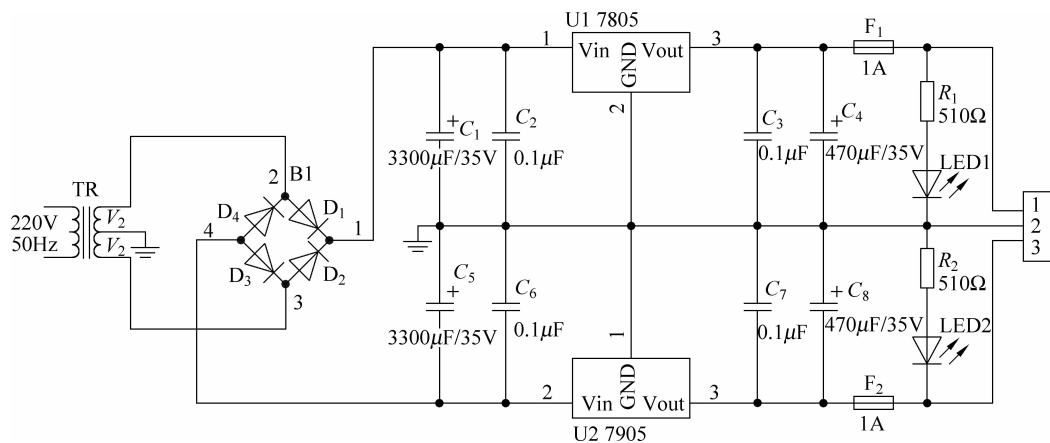


图 3-2-1 $\pm 5V$ 的直流稳压电源的原理图

本设计的主要任务是根据性能指标要求正确地选定集成稳压器、变压器、整流二极管及滤波电容。

1. 集成稳压器的选择

三端固定式集成稳压器最常用的产品为 78XX 系列和 79XX 系列。78XX 系列为正电压输出,79XX 为负电压输出。型号中最末两位数字表示它们输出电压值,如 7805 表示输出电压为 +5V,7912 表示输出电压为 -12V。78XX 系列和 79XX 系列的输出电压有 5V、6V、8V、9V、10V、12V、15V、18V、24V 等九种不同的挡次,输出电压精度在 $\pm 2\% \sim \pm 4\%$ 之间。78XX 系列和 79XX 系列的输出电流也有不同的挡次。经常使用的有输出电流为 100mA 的 78LXX/79LXX、输出电流为 500mA 的 78MXX/79MXX、输出电流为 1A 的 78XX/79XX 和输出电流为 1.5A 的 78HXX/79HXX 四个系列。

根据本设计直流稳压电源输出电压和输出电流的指标,三端集成稳压器的型号应选用 7805 和 7905。7805 和 7905 输出电压分别为 +5V 和 -5V,输出电流为 1.0A,满足设计要求。

在使用 7805 和 7905 时要注意以下几点:

① 引脚不能接错。图 3-2-2 为 7805 和 7905 引脚排列和外形图,采用 TO-220 封装。

② 要注意稳压器的散热。图 3-2-3 为三端固定式稳压器内部组成框图。调整管 T 的功耗等于输入输出电压差和输出电流的乘积。T 的功耗几乎全部变成热量,使稳压器温度升高。若发热量比较少时,可以依靠稳压器的封装自行散热。若稳压器输出电流增大,则发热量增大,必须加适当的散热片。

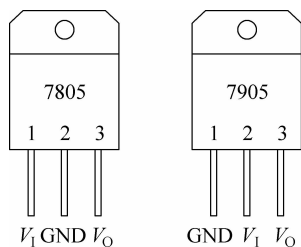


图 3-2-2 7805 和 7905 引脚排列和外形图

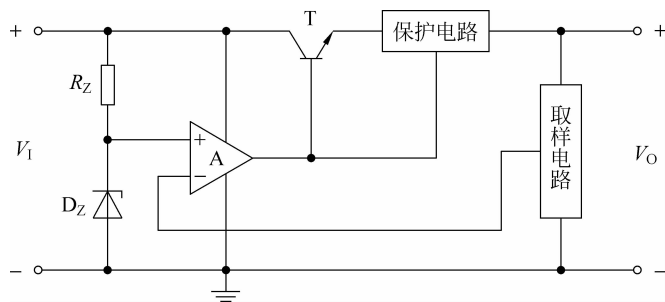


图 3-2-3 三端式固定式稳压器内部组成框图

③ 稳压器的输入电压 V_1 应处在一定的范围。稳压器的输入电压 V_1 可由下式确定:

$$V_{1,\min} \leq V_1 \leq V_{1,\max} \quad (3-2-1)$$

式中: $V_{1,\min}$ 为稳压器的最小输入电压(input min voltage); $V_{1,\max}$ 为稳压器的最大输入电压(input max voltage)。 $V_{1,\max}$ 和 $V_{1,\min}$ 由集成稳压器的数据手册提供,以 LM7805 为例,其 $V_{1,\max}$ 和 $V_{1,\min}$ 的值分别为 35V 和 7.2V。因此,稳压器的输入电压应大于 7.2V 且小于 35V。

2. 电源变压器的选择

通常根据变压器二次(次级)侧输出的功率 P_2 来选择变压器。二次侧输出的功率 P_2 取决于输出电压和输出电流。对于容性负载,变压器二次(次级)侧的输出电压 V_2 与稳

压器输入电压 V_1 的关系为

$$V_2 = V_1 / (1.1 \sim 1.2) \quad (3-2-2)$$

由于 V_1 越大,集成稳压器的压差越大,功耗也就越大。 V_1 在满足式(3-2-1)的前提下不宜取太大,考虑交流电压的波动, V_1 取 9V 比较适宜。根据式(3-2-2),变压器二次侧电压 V_2 取 8V。注意该二次侧电压 V_2 是指图 3-2-1 中变压器二次侧中间抽头与两边接线端之间电压,加到二极管整流桥上的电压应为 $2 \times 8V = 16V$ 。

变压器二次侧输出电流 $I_2 \geq I_{Omax} = 1A$,变压器二次侧输出功率 $P_2 = I_2 V_2 = 16W$ 。由表 3-2-1 可得变压器效率 $\eta = 0.7$,则一次侧(次级)输入功率 $P_1 \geq P_2 / \eta = 16 / 0.7 = 22.85W$,可选功率为 25W 的变压器。

表 3-2-1 小型变压器效率

二次侧输出功率 P_2/W	<10	10~30	30~80	80~200
效率 η	0.6	0.7	0.8	0.85

3. 滤波电容选取

电容的参数包括耐压值和电容值两项。耐压值比较容易确定,对于稳压器输入侧的电容,其耐压值只要大于 $\sqrt{2}V_2$ 即可;对于稳压器输出侧的滤波电容,其耐压值大于 V_O 即可。对于电容值的选取,可以遵循以下原则:

① C_2 、 C_3 、 C_6 、 C_7 的作用是减少纹波、消振、抑制高频脉冲干扰,可采用 $0.1 \sim 0.47\mu F$ 的陶瓷电容;

② C_4 、 C_8 为稳压器输出侧滤波电容,起到减少纹波的作用,根据经验,一般电容值选取 $47 \sim 470\mu F$;

③ C_1 、 C_5 为稳压器输入侧的滤波电容,其作用是将整流桥输出的直流脉动电压转换成纹波较小的直流电压。 C_1 、 C_5 滤波电容在工作中由充电和放电两部分组成。为了取得比较好的滤波效果,要求电容的放电时间常数大于充电周期的(3~5)倍。对于桥式整流电路,电容的充电周期为交流电源的半周期(10ms),而放电时间常数为 $R_L C$,因此, C_1 、 C_5 滤波电容值可以采用以下方法估算

$$C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2R_L} \quad (3-2-3)$$

式中, T 为交流电源的周期; R_L 为等效直流电阻。稳压器的输入电压 V_1 约为 9V,最大输入电流为 1A,等效直流电阻 R_L 为

$$R_L = \frac{9V}{1A} = 9\Omega$$

取电容的放电时间常数等于充电周期的 3 倍,根据式(3-2-3)得到

$$C = 3 \times \frac{0.02s}{2 \times 9\Omega} \approx 3300\mu F$$

从上述估算中也可以看到,滤波电容的取值与稳压电源的输出电流直接相关,输出电流越大,滤波电容的容量也越大。有时直接根据输出电流大小选取滤波电容,其经验数据为 I_O 在 1A 左右, C 选用 $4000\mu F$; I_O 在 100mA 以下时, C 选用 $200 \sim 500\mu F$ 。

4. 整流二极管选取

整流电路是由四只完全相同的二极管组成的。为了缩小体积,通常选用将四只二极管封装在一起的整流桥堆来构成整流电路。整流桥堆的引脚排列和内部电路如图 3-2-4 所示。整流二极管 $D_1 \sim D_4$ 的反向击穿电压 V_{RM} 应满足 $V_{RM} > 2\sqrt{2}V_2$, 额定工作电流应满足 $I_F > I_{O,\min}$ 。

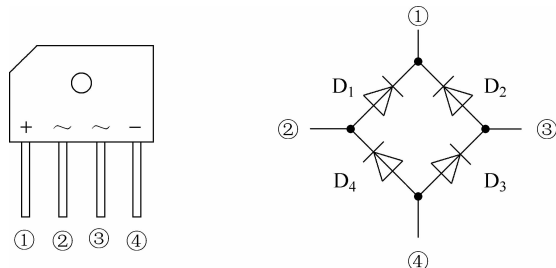


图 3-2-4 二极管整流桥堆

3.3 可调式直流稳压电源设计

可调式三端稳压器输出连续可调的直流电压,如 LM317 稳压器输出连续可调的正电压,LM337 稳压器输出连续可调的负电压,可调范围为 $1.2 \sim 37V$,最大输出电流 $I_{O,\max}$ 为 $1.5A$ 。LM317 与 LM337 内部含有过流、过热保护电路,具有安全可靠、性能优良、不易损坏、使用方便等优点。LM317 与 LM337 的电压调整率和电流调整率均优于固定集成稳压器构成的可调电压稳压电源。LM317 和 LM337 的引脚排列和使用方法相同,其引脚排列和典型的连接图如图 3-3-1 所示。

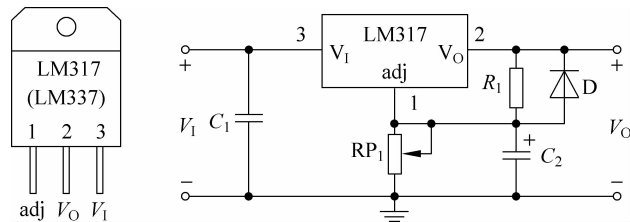


图 3-3-1 LM317 的引脚排列和典型连接图

在忽略调整端电流 I_{adj} (一般为 $0.05 \sim 0.1mA$) 的情况下,可写出输出电压 V_O 的表达式为

$$V_O = 1.25 \left(1 + \frac{RP_1}{R_1} \right) \quad (3-3-1)$$

式中的 1.25 是集成稳压块输出端和调整端之间的固有参考电压 V_{REF} , 此电压加于给定电阻 R_1 两端,将产生一个恒定电流通过输出电压调节器 RP_1 。电阻 R_1 常取值 $120 \sim 240\Omega$, RP_1 一般使用精密电位器,与其并联的电容 C_2 可进一步减小输出电压的纹波。二

极管 D 的作用是防止输出端短路时, C_2 上的电压损坏稳压块。

例 3-3-1 试设计一可调式集成稳压电源, 其性能要求指标为 $V_O = +3 \sim +9\text{V}$, $I_{O,\max} = 800\text{mA}$ 。

解 (1) 确定电路形式

可调式集成稳压电源的电路如图 3-3-2 所示。

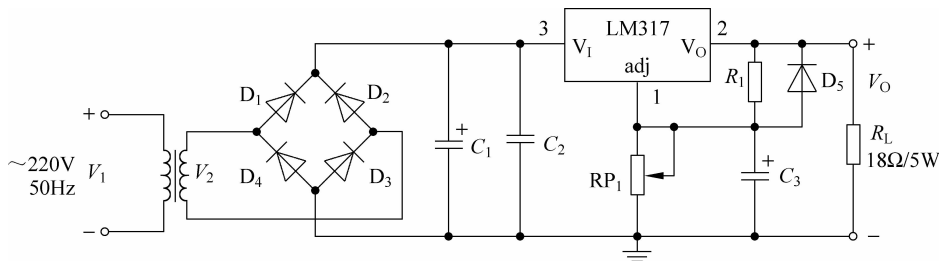


图 3-3-2 例 3-3-1 设计原理图

(2) 选集成稳压器

选用可调式三端稳压器 LM317, 其特性参数为 $V_O = 1.2 \sim 37\text{V}$, $I_{O,\max} = 1.5\text{A}$, 最小输入输出压差 $(V_O - V_1)_{\min} = 3\text{V}$, 最大输入输出压差 $(V_O - V_1)_{\max} = 40\text{V}$, 均满足性能指标要求。

(3) 选电源变压器

通常根据变压器的二次输出功率 P_2 来选择变压器。由式(3-2-1)可得 LM317 的输入电压 V_1 的范围为

$$V_{O,\max} + (V_1 - V_O)_{\min} \leq V_1 \leq V_{O,\min} + (V_1 - V_O)_{\max}$$

则

$$9\text{V} + 3\text{V} \leq V_1 \leq 3\text{V} + 40\text{V}$$

$$12\text{V} \leq V_1 \leq 43\text{V}$$

由式(3-2-2)得

$$V_2 \geq V_{1\min}/1.1 = 12/1.1\text{V} = 11\text{V}$$

$I_2 \geq I_{O,\max} = 0.8\text{A}$, 取 $I_2 = 1\text{A}$ 。

变压器副边输出功率 $P_2 \geq I_1 V_2 = 11\text{W}$ 。

由表 3-2-1 可得变压器效率 $\eta = 0.7$, 则原边输入功率 $P_1 \geq P_2/\eta = 15.7\text{W}$ 。为留有余地, 一般选功率为 20W 的变压器。

(4) 选整流二极管

整流二极管 $D_1 \sim D_4$ 选 1N4001, 其极限参数为 $V_{\text{RM}} \geq 50\text{V}$, 而 $\sqrt{2}V_2 = 15.6\text{V}$, 所以 V_{RM} 满足要求。 $I_{\text{F}} = 1\text{A}$, 而 $I_{O,\max} = 0.8\text{A}$, 故 I_{F} 也满足要求。

(5) 选滤波电容

稳压器的输入电压 V_1 最小值为 12V , 工作电流为 800mA , 等效直流电阻为

$$R_L = \frac{12\text{V}}{0.8\text{A}} = 15\Omega$$

根据式(3-2-3)有

$$C_1 = 5 \times \frac{0.02s}{2 \times 15\Omega} \approx 3300\mu F$$

电容 C_1 的耐压应大于 $\sqrt{2}V_2=15.6V$ 。

3.4 开关直流稳压电源设计

1. DC/DC 变换器的基本原理

DC/DC 变换器就是直流/直流变换器,是开关型稳压电源的核心组成部分。在电子系统设计中,DC/DC 变换是一种非常有用的电子技术,其主要优点是:

① 便于电源的标准化,有利于简化电源设备。一个电子系统可能需要多种电源,在制作电源时,可以只制作一路电源,然后采用 DC/DC 技术来得到电子系统中的多路电源。

② 实现浮地供电。当有些场合需要浮地供电时,就用变压器隔离的 DC/DC 变换器来实现浮地供电。

DC/DC 变换器的基本类型有降压型(Buck 变换器)、升压型(Boost 变换器)、极性反转型(Buck-Boost 变换器)。

降压型 DC/DC 变换器原理图如图 3-4-1 所示。该电路由两部分组成,第一部分是由功率开关管 T 组成的逆变器,在脉冲信号 v_B 的控制下,将输入直流电压 V_1 变成脉冲信号。第二部分是由 L 、 C 组成的低通滤波器。当 v_B 为高电平时, T 饱和导通,输入电压 V_1 经 T 加到二极管 D 两端,此时,二极管 D 承受反向电压而截止,负载中有电流 i_O 流过,电感 L 储存能量,同时向电容 C 充电。当 v_B 为低电平时, T 由导通变为截止,滤波电感产生自感电势,使二极管 D 导通,于是电感中储存的能量通过 D 向负载 R_L 释放,使负载 R_L 继续有电流流过,因而, D 也常称为续流二极管。由此可见,虽然调整管处于开关工作状态,但由于二极管 D 的续流作用和 L 、 C 的滤波作用,输出电压是比较平稳的。假设 t_{on} 是调整管 T 的导通时间, t_{off} 是调整管 T 的截止时间,不难分析得到,在忽略滤波电感 L 的直流压降的情况下,输出电压的平均值为

$$V_O \approx V_1 \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = qV_1 \quad (3-4-1)$$

式中, q 为 v_B 的占空比。由式可见,对于一定的 V_1 值,在开关转换周期 T 不变时,通过调节占空比即可调节输出电压 V_O 。由于 $q \leq 1$, 因此, $V_O \leq V_1$, 称此电路为降压型 DC/DC 变换电路。

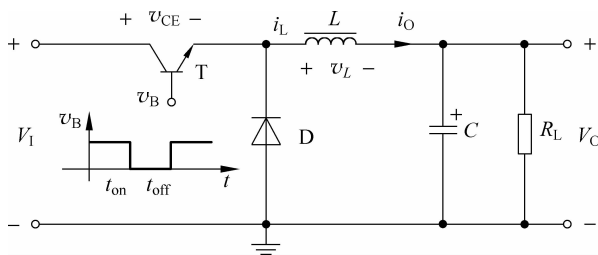


图 3-4-1 降压型 DC/DC 变换器原理电路

升压型 DC/DC 变换器原理图如图 3-4-2 所示。当 v_B 为高电平时, T 饱和导通, 输入电压 V_I 直接加到电感 L 两端, i_L 线性增加, 电感产生反电势, 电感两端电压方向为左正右负, L 储存能量, 二极管 D 反偏而截止, 此时, 电容 C 向负载提供电流, 并维持 V_O 不变; 当 v_B 为低电平时, T 截止, i_L 不能突变, 电感产生反电势, 左负右正, 此时, v_L 与 V_I 相加, 因而输入侧的电感常称升压电感, 当 $V_I + v_L > V_O$ 时, D 导通, $V_I + v_L$ 给负载提供电流, 同时又向 C 充电, 显然输出电压 $V_O > V_I$, 称此电路为升压型开关稳压电路。

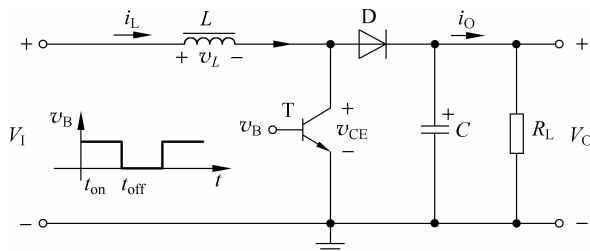


图 3-4-2 升压型 DC/DC 变换器原理电路

极性反转型 DC/DC 变换器原理图如图 3-4-3 所示。当 v_B 为高电平时, 调整管 T 导通, V_I 加在线圈 L 两端, L 两端感应的电压 v_L 上正下负, D 截止, L 开始储能, i_L 线性增大。当 v_B 为低电平时, 调整管 T 截止, L 两端的反电动势 V_I 为上负下正, 二极管 D 导通, 负载 R_L 上得到经过电容 C 滤波、与反电动势 v_L 极性相同的直流输出电压 V_O 。由于反电动势 v_L 为上负下正, 与输入电压 V_I 极性相反, 而输出电压 V_O 与反电动势 v_L 的极性相同, 所以 V_O 与 V_I 的极性总是相反, 故称其为极性反转型变换器。

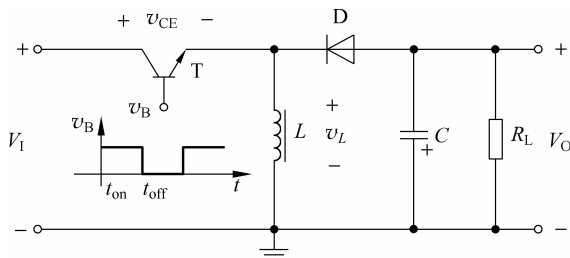


图 3-4-3 极性反转型 DC/DC 变换器原理电路

2. 实用 DC/DC 电源设计

(1) 降压 DC/DC 电源设计

MC34063 是一种微功耗集成开关式稳压块, 其引脚排列和内部框图如图 3-4-4 所示。MC34063 内部包含了 DC/DC 变换器所需要的主要电路: 内部温度补偿参考电压源, 电压比较器, 振荡器, PWM 控制器, 驱动电路, 大电流输出的开关等。MC34063 可通过外接电感器、电容器和续流二极管的不同连接方法来实现升压功能、降压功能和反转极性功能, 应用十分广泛。

当需要从较高的直流电压取出较低的直流电压时, 可采用 MC34063 构成的直流降压电路, 其原理图如图 3-4-5 所示。输入电压为 24V, 经直流变换降压以后, 直接降至 5V 输出, 且变换效率高达 80%~85%。该电路的输出电流为 300mA。

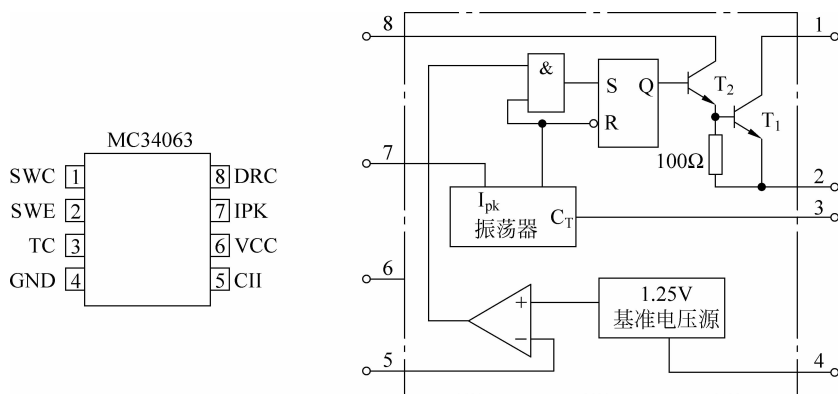


图 3-4-4 MC34063 引脚排列和原理框图

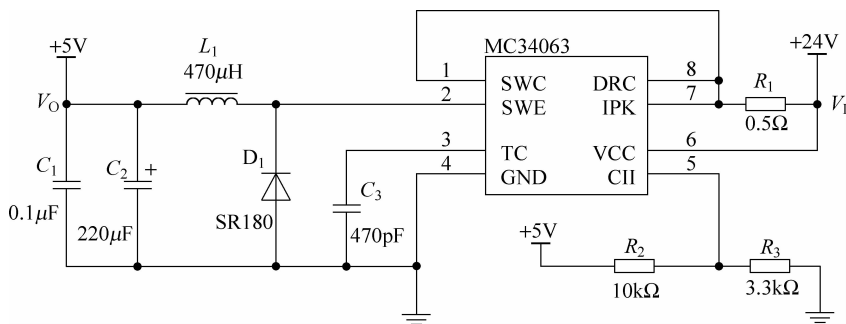


图 3-4-5 由 MC34063 构成的降压电路

(2) 升压 DC/DC 电源设计

TI 公司生产的 TPS60110 是升压型 DC-DC 电荷泵,可产生 $5(1 \pm 4\%)V$ 的输出电压,输入电压的范围为 $2.7 \sim 5.4V$ (三节碱性、镍镉或镍氢电池;一节锂或锂离子电池),当输入 $3V$ 电压时,输出电流可达 $300mA$,仅仅需要四个外接电容,即可构成一个完整的低噪声 DC-DC 转换器。为确保电流连续输出时,产生非常低的输出电压纹波,两个单端电荷泵采用推挽工作模式。当输入 $3V$ 时,TPS60110 满载启动,负载电阻为 16Ω ,TPS60110 典型连接图如图 3-4-6 所示。

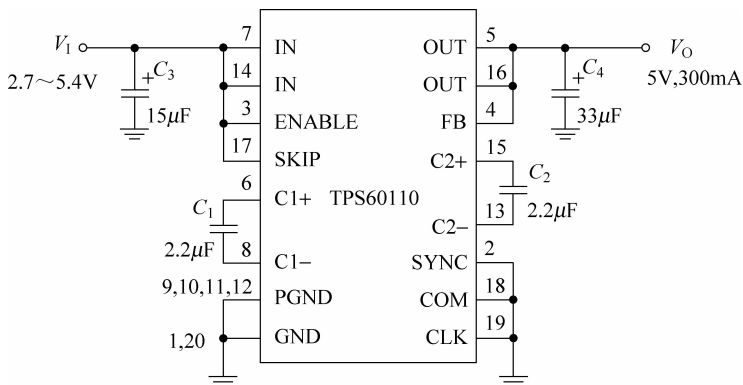


图 3-4-6 由 TPS60110 组成的 DC/DC 升压电路

TPS60110 采用恒定的开关频率,使产生的噪声和输出的电压纹波最小;同时还采用节电脉冲跳过模式来延长轻负载下电池的使用寿命。TPS60110 的开关频率为 300kHz,逻辑关闭功能使供电电流小至 $1\mu\text{A}$ (最大值)并且负载从输入端断开。特殊的电流控制电路可防止启动时从电池吸收过多的电流。该 DC/DC 转换器无需外接电感,并且电磁干扰非常低。

(3) 极性反转 DC/DC 电路设计

在实际电子系统设计中,常需将一组正电源转换成正、负两组电源。TPS6735 能够将 $+5\text{V}$ 的电源转化为 -5V 电源,TPS6735 典型的连接图如图 3-4-7 所示。TPS6735 只需要少量的外部元件:电感、输出滤波电容、输入滤波电容、参考源滤波电容、肖特基二极管。TPS6735 有一使能输入端 EN,不需要 -5V 电压输出时可以关断 DC/DC 变换器。当 EN 为低电平时,TPS6735 的空载电流由 1.9mA 降为 $1\mu\text{A}$ 。

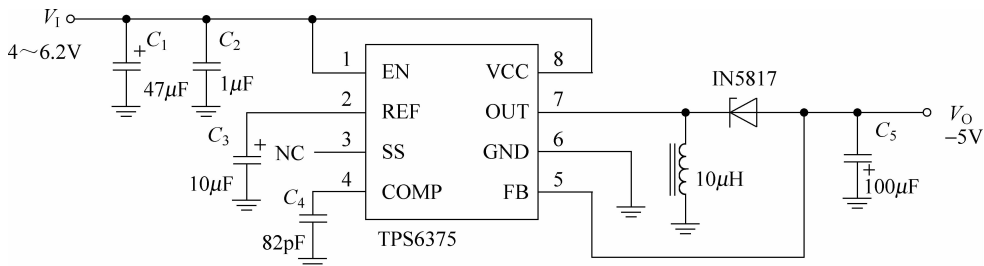


图 3-4-7 由 TPS6735 组成的 $+5\text{V}/-5\text{V}$ DC/DC 电路

3.5 设计训练题

设计训练题一：线性直流稳压电源设计

设计一线性直流稳压电源,假设交流输入电压为 220V 、 50Hz ,电压变化范围 $+10\%\sim-10\%$ 。要求输出 $\pm 15\text{V}$ 的直流电压,输出电流 I_O 为 500mA 。

设计训练题二：升压电路及极性反转电路设计

利用 DC/DC 变换器 MC34063 完成如下设计:

- ① 设计升压电路。已知输入电压 $V_1=12\text{V}$,要求输出电压 $V_O=24\text{V}$, $I_O=175\text{mA}$ 。
- ② 设计极性反转电路。已知输入电压 $V_1=5\text{V}$,要求输出电压 $V_O=-5\text{V}$, $I_O=300\text{mA}$ 。