



Power Electronics

现代电力电子技术

戴卫力 Ph.D

河海大学常州校区计信学院电气系

E-mail: daiwl@hhuc.edu.cn

电力电子技术



Power Electronics

- 隔离式直-直变换器
- 单相无源逆变器
- 缓冲器
- 磁性元件
- 滤波器
- 谐振变换器

河海大学常州校区计信学院电气系

E-mail: daiwl@hhuc.edu.cn



Power Electronics

参考书目

- [1] 赵修科, 磁性元器件分册, 辽宁科学技术出版社。
- [2] Abraham I.Pressman, Switching Power Suply Design, MC Graw-Hill Companies.
- [3] 王聪, 软开关功率变换器及其应用,科学出版社。
- [4] 刘凤君, 正弦波逆变器,科学出版社。
- [5] 杨玉岗, 现代电力电子的磁技术,科学出版社。



隔离式直-直变换器

直-直基本变换器拓扑  隔离变压器

-  变换器输入电源与负载之间实现电气隔离
-  匹配变换器输入、输出电压
-  实现变换器多路输出

分类:

- 单管变换器 变压器单向磁化, 利用率低
- 双管或多管变换器 变压器双向磁化, 利用率高

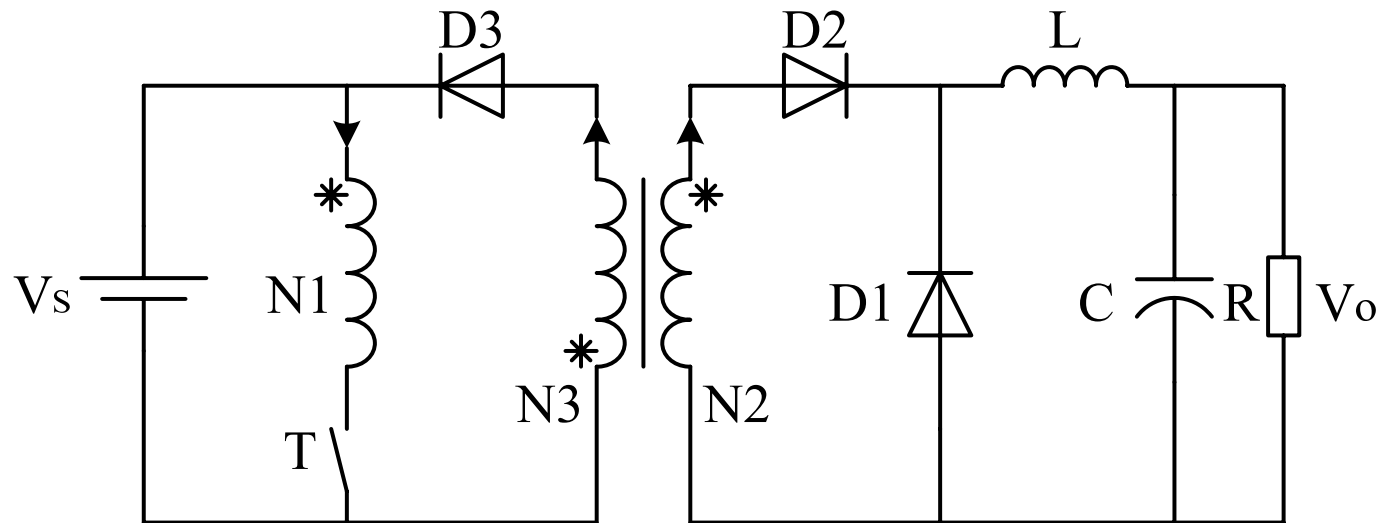


Power Electronics

➤ 正激变换器 电能 → 负载

➤ 反激变换器

电能 → 磁能 → 电能 → 负载



河海大学常州校区计信学院电气系

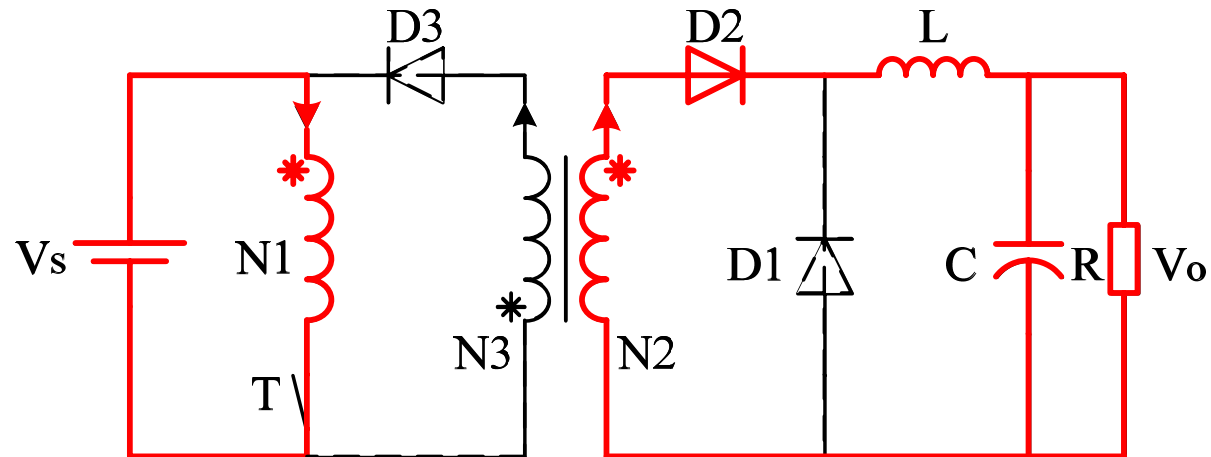
E-mail: daiwl@hhuc.edu.cn

电力电子技术



Power Electronics

工作原理



T导通期间:

$$V_s = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad \longrightarrow \quad \Delta\phi = (V_s / N_1) T_{on}$$

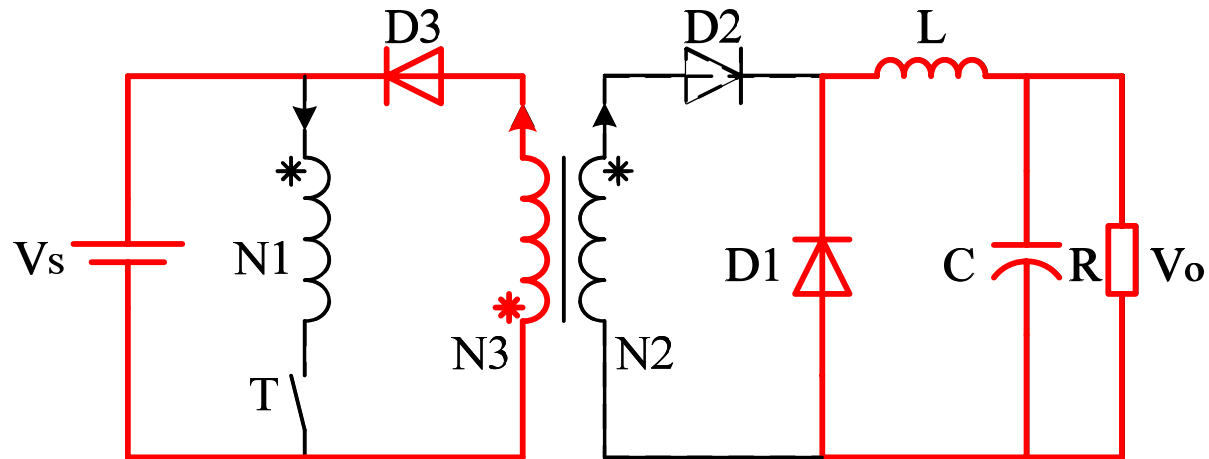
输出电压:

$$v_o = V_s (N_2 / N_1)$$



Power Electronics

工作原理



T关断期间:

$$V_s = -N_3 \frac{d\phi}{dt} \quad \longrightarrow \quad \Delta\phi' = -(V_s / N_3) T_{off}$$

输出电压:

$$v_o = 0$$

河海大学常州校区计信学院电气系

电力电子技术

E-mail: daiwl@hhuc.edu.cn



Power Electronics

$|\Delta\phi| > |\Delta\phi'| \longrightarrow D > N_1 / (N_1 + N_3) \longrightarrow$ 变压器铁心趋于饱和



变压器正常工作?

$$D \leq N_1 / (N_1 + N_3)$$

在电流连续工作状态,一个工作周期内,磁通平衡

$$V_o = \frac{N_2}{N_1} D V_s$$

在T阻断、D3导通期间,开关管T两端电压

$$V_T = V_s + \frac{N_1}{N_3} V_s$$

通常, $N_3 = N_1$, 开关管T两端电压

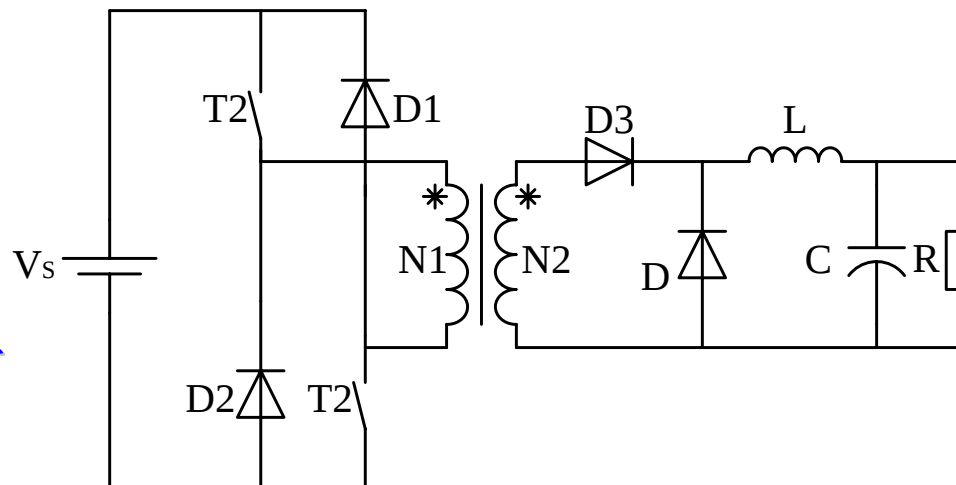
$$V_T = 2$$



Power Electronics

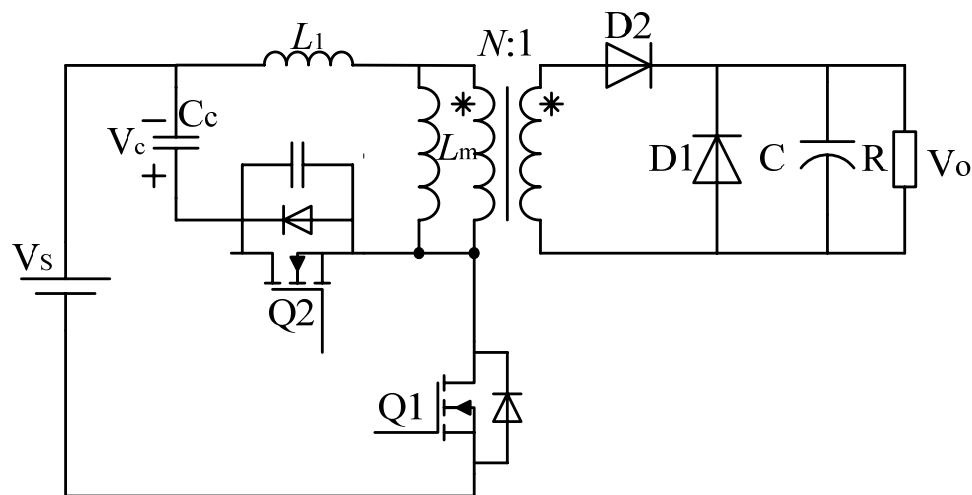
如何减小开关应力？

- ◆增加一个开关管
- ◆开关管耐压降低1倍
- ◆变压器少个磁通复位绕组



如何进行磁复位？

- ◆零电压开关
- ◆占空比 >0.5
- ◆变压器磁通实现自动复位
- ◆磁化曲线工作在一、三象限，提高了磁芯利用率

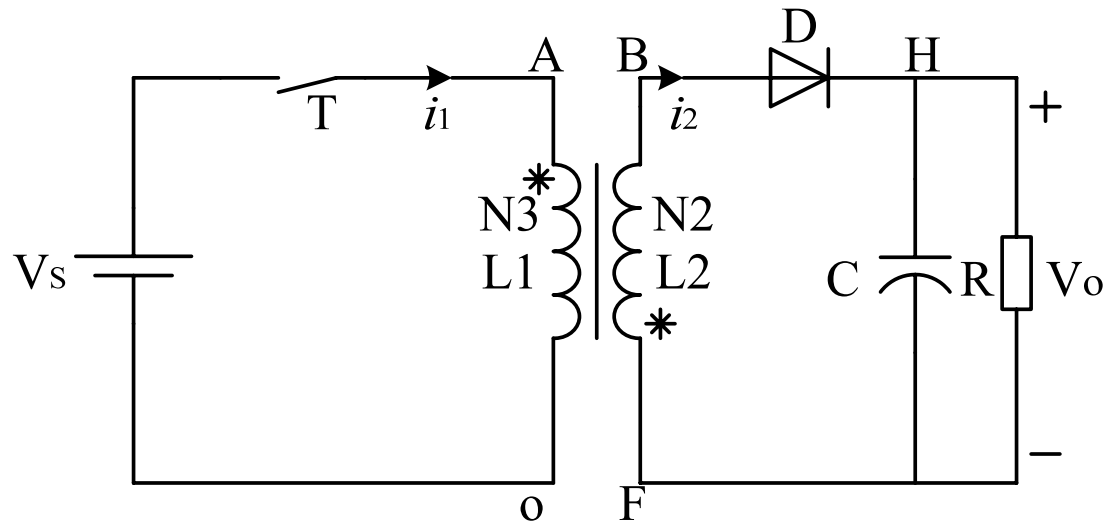


河海大学常州校区计信学院电气系



Power Electronics

单端反激变换器(Flyback Converter)



T导通期间:

$$V_S = L_1 \frac{di_1}{dt} = N_1 \frac{d\phi}{dt} \longrightarrow \begin{aligned} \Delta\phi &= (V_S / N_1)DT_s \\ \Delta i_1 &= (V_S / L_1)DT_s \end{aligned}$$

N1绕组电感电流转到N2绕组电感电流的前后安匝不变

$$I_{1\max} N_1 = i_{20} N_2$$

河海大学常州校区计信学院电气系

电力电子技术

E-mail: daiwl@hhuc.edu.cn



Power Electronics

T关断期间： 二极管D导通

$$L_2 \frac{di_2}{dt} = N_2 \frac{d\phi}{dt} = -V_o \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} I_{2\min} &= i_{20} - \frac{V_o}{L_2} (1-D)T_s \\ \Delta\phi' &= \frac{V_o}{N_2} (1-D)T_s \end{aligned}$$

在T阻断结束,再次导通瞬间,由安匝相等原理:

$$i_{10} = I_{2\min} (N_2 / N_1)$$

**在一个稳态周期内,磁通的增加量应等于磁通的减少量,
可得输出电压平均值:**

$$V_o = \frac{N_2}{N_1} \frac{D}{1-D} V_s$$

变压比: $M = \frac{V_o}{V_s} = \frac{N_2}{N_1} \frac{D}{1-D}$

占空比: $D = \frac{\frac{N_1}{N_2} \frac{V_o}{V_s}}{1 + \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{V_o}{V_s}} = \frac{1}{1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{V_s}{V_o}}$



Power Electronics

电流连续条件的确定

电源在一个周期内提供的电流平均值 $I_S = \frac{1}{2}(i_{10} + I_{1\max}) \frac{T_{on}}{T_S} = (i_{10} + \frac{V_S}{2L_1} DT_S) D$

电源输入功率等于输出功率 $I_S DV_S = V_o I_o$

得
$$i_{10} = \frac{N_2}{N_1} \bullet \frac{I_o}{1-D} - \frac{DT_S}{2L_1} V_S$$

$$I_{1\max} = i_{10} + \Delta i_1 = \frac{N_2}{N_1} \bullet \frac{I_o}{1-D} + \frac{DT_S}{2L_1} V_S$$

$$I_{2\min} = \frac{N_1}{N_2} i_{10} = \frac{N_1}{N_2} \left(\frac{N_2}{N_1} \bullet \frac{I_o}{1-D} - \frac{DT_S}{2L_1} V_S \right)$$

为使开关T整个阻断期间,N2绕组的磁能都向负载供电,必须使T阻断期结束时, $I_{2\min}$ 仍大于零,不断流的条件是:

$$I_o \geq \frac{N_1}{N_2} \frac{D(1-D)}{2L_1 f_s} V_S = \frac{N_1}{N_2} \frac{D(1-D)}{2L_1 f_s} \bullet \frac{N_1}{N_2} \frac{1-D}{D} V_o = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{(1-D)^2}{2L_1 f_s} V_o$$

$$D \geq 1 - \frac{N_2}{N_1} \sqrt{\frac{2L_1 f_s I_o}{V_o}} = 1 - \frac{N_2}{N_1} \sqrt{\frac{2L_1 f_s}{R}}$$

河海大学常州校区计信学院电气系

E-mail: daiwl@hhuc.edu.cn



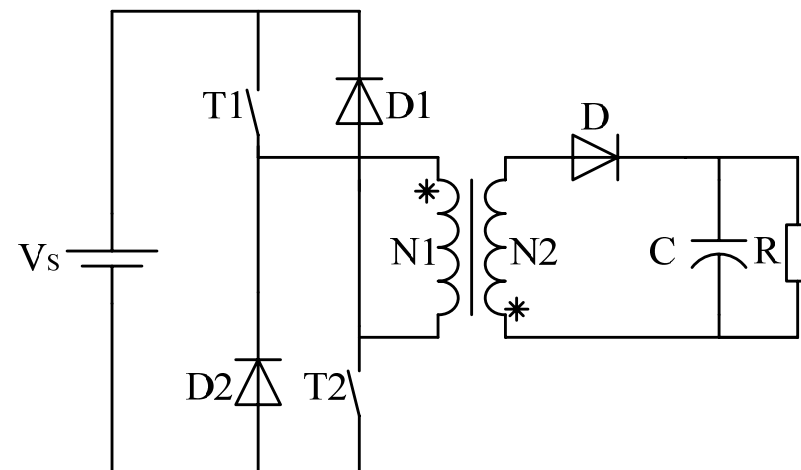
Power Electronics

开关管阻断时,承受的最高电压为

$$V_{T\max} = V_s + \frac{N_1}{N_2} V_o = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{V_o}{D}$$

在负载为零的极端情况下,由于T导通时存在变压器电感中的磁能无处消耗,输出电压越来越高.反激变换器不能在空载下工作.

如何减小开关应力?



河海大学常州校区计信学院电气系

E-mail: daiwl@hhuc.edu.cn



Power Electronics

设计实例: Flyback Converter $V_s=12V \pm 10\%$ $f_s=100kHz$

$I_o=1A$ $V_o=48V$ $V_{opp} \leq 1\%$

计算: N_2/N_1 L1 确定C值并选择开关管T及二极管D

解答: 假设 开关管T及二极管D的导通压降为1V;

V_s 输入电压、N1绕组电压的范围:9.8-12.2V

N2绕组电压49V

1) 计算变压器匝比:
$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{1-D}{D} = \frac{49}{11} \times \frac{1-0.5}{0.5} = 4.45$$

取 $N_2/N_1=4.5$

2) 计算最大最小占空比:
$$D = \frac{1}{1 + \frac{N_2}{N_1} \frac{V_s}{V_o}} = \frac{1}{1 + \frac{N_2}{N_1} \frac{V_1}{V_2}}$$



Power Electronics

V1最大时，有最小占空比：

$$D_{\min} = \frac{1}{1 + 4.5 \times \frac{12.2}{49}} = 0.4716$$

V1最小时，有最大占空比：

$$D_{\max} = \frac{1}{1 + 4.5 \times \frac{9.8}{49}} = 0.526$$

令最小负载电流大于最小临界连续电流，有

$$I_{o\min} \geq I_{oB} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{V_o}{2L_1 f_s} (1-D)^2$$

因此电感有

$$L_1 \geq \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{V_o}{2I_{o\min} f_s} (1-D)^2$$

河海大学常州校区计信学院电气系



Power Electronics

取最小占空比，此时要求的L最大，将值代入上式得

$$L_1 \geq 34\mu H$$

取 $L_1=40\mu H$,则

$$I_{oB} = \left(\frac{1}{4.5}\right)^2 \times \frac{49 \times (1-0.4716)^2}{2 \times 40 \times 10^{-6} \times 100 \times 10^3} A = 0.085A < I_{o\min} = 0.1A$$

输出电压脉动计算公式同boost电路

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = D \frac{f_c}{f_s} = D \frac{1}{f_s} \frac{1}{RC} \leq 0.01$$

占空比最大，R最小时，输出电压脉动最大，则有

$$f_c = \frac{1}{RC} \leq \frac{0.01 \times f_s}{D} = \frac{0.01 \times 100 \times 10^3}{0.526} \text{ Hz} = 1.9\text{ kHz}$$



Power Electronics

因此，电容有

$$C \geq \frac{1}{R \bullet f_c} = \frac{1}{48 \times 1.9 \times 10^3} = 10.96 \mu F$$

取 $C=12\mu F$

验算

$$f_c = \frac{1}{48 \times 12 \times 10^{-6}} \text{ Hz} = 1.736 \text{ kHz}$$

$$\frac{\Delta V_o}{V_o} = 0.526 \times \frac{1.736}{100} = 0.91\% < 1\%$$

满足要求！

开关管及二极管计算

负载电流 $I_o=1A$, 折算到变压器 N_1 侧 $I_o' = 1 \times \frac{N_2}{N_1} = 4.5A$

开关管T导通期间电流最大值：

$$I_{T \max}' = I_{1 \max} = \frac{N_2}{N_1} \frac{I_o}{1-D} + \frac{V_s D T_s}{2L_1} = 10.3A$$

河海大学常州校区计信学院电气系



Power Electronics

二极管D导通期间电流最大值:

$$I'_{D\max} = i_{20} = \frac{N_1}{N_2} I_{1\max} = \frac{1}{4.5} \times 10.3\text{A} = 2.29\text{A}$$

开关管承受最大正向电压:

$$V'_{T\max} = V_s + V_2 \times \frac{N_1}{N_2} = (12 \times 1.1 + 49 \times \frac{1}{4.5})\text{V} = 24\text{V}$$

二极管D1承受最高反向电压为:

$$V'_{D\max} = (12 \times 1.1 - 1) \frac{N_2}{N_1} + 48 = (54.9 + 48)\text{V} = 103\text{V}$$



Power Electronics

习 题

设计一个变换器的MOS管驱动电源，其要求参数如下：

1) 可采用Forward或Flyback变换器；

2) 性能指标：

◆输入电压：18VDC-32VDC

◆输出电压：15V/0.2A(3路)

15V/0.4A(1路)

◆输出功率：18W

◆效率：75%

◆最大占空比： $D_{\max}=0.45$

◆工作频率:100kHz

河海大学常州校区计信学院电气系

E-mail: daiwl@hhuc.edu.cn



Power Electronics

3) 需完成如下设计工作

- ◆设计变换器主电路，输出滤波器，并计算选取其参数；
- ◆变换器功率开关，副边整流二极管选取；
- ◆输出滤波器的无源器件（如电感和电容）；
- ◆隔离变压器的设计，包括磁芯的选取，绕组的匝数，线径计算等；

要求：提供足够多的分析和计算，必要的时候可应用matlab，pspice等仿真软件进行辅助设计，以满足你的设计要求。同时，利用protel软件画出主电路设计图。在进行功率开关、二极管、磁芯等的选取时，可以到下述网站参照相应器件的datasheet为依据进行选取，以丰富你的设计数据，选取时应进行详细地说明依据。（注意：现成的器件，如EMI滤波器、电感器和变换器单元不允许使用！）



Power Electronics

4) 器件网站

国际整流公司: www.Irf.com

美国IXYS公司: www.IXYS.com

德国英飞凌公司: www.infineon.com/cn

美国仙童飞兆半导体公司: <http://www.fairchildsemi.com/cn/>

浙江横店东磁集团: <http://www.chinadmegc.com>

5) 参考文献

- [1]磁性元器件分册, 实用电源技术手册, 赵修科, 辽宁科学技术出版社, 2002.8
- [2]开关电源应用、设计与维修, 常敏慧 等编著, 科学技术文献出版社, 2000.3
- [3]开关电源实用技术——设计与应用, 周志敏等编著, 人民邮电出版社, 2003.8
- [4]稳定电源电路设计手册, 曲学基等编著, 电子工业出版社, 2003.10
- [5]新型开关电源实用技术, 王英剑等编著, 电子工业出版社, 1999.4
- [6]开关电源的原理与设计, 张占松, 蔡宣三编著, 电子工业出版社, 1998.7

河海大学常州校区计信学院电气系

电力电子技术

E-mail: daiwl@hhuc.edu.cn