

《电力电子技术》

实验指导书(第3版)

长江大学电信学院

目 录

实验名称	页码
实验 1 锯齿波同步移相触发电路与单相桥式半控整流电路实验	3
实验 2 三相桥式全控整流及有源逆变电路实验	8
实验 3 直流斩波电路实验	11
实验 4 电力晶体管 (GTR) 特性与驱动电路研究	14
实验 5 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 特性与驱动电路研究	22

实验一 锯齿波同步移相触发电路与单相桥式半控整流电路实验

一. 实验目的

1. 加深理解锯齿波同步移相触发电路的工作原理及各元件的作用。
2. 掌握锯齿波同步触发电路的调试方法。
3. 研究单相桥式半控整流电路在电阻负载，电阻—电感性负载及反电势负载时的工作。
4. 进一步理解可控硅的开关条件，了解续流二极管在电路中的作用。
5. 掌握双踪示波器在电力电子线路实验中的使用特点与方法。

二. 实验内容

1. 锯齿波同步触发电路的调试。
2. 锯齿波同步触发电路各点波形观察，分析
3. 单相桥式半控整流电路供电给电阻性负载。
4. 单相桥式半控整流电路供电给电阻—电感性负载（带续流二极管）。
5. 单相桥式半控整流电路供电给反电势负载（带续流二极管）。
6. 单相桥式半控整流电路供电给电阻—电感性负载（断开续流二极管）

三. 实验设备及仪器

1. MCL 系列教学实验台主控制屏
2. MCL—18 组件（适合 MCL—II）或 MCL—31 组件（适合 MCL—III）
3. MCL—33 组件或 MCL—53 组件（适合 MCL—II、III、V）
4. MCL—05 组件或 MCL—05A 组件
5. MEL—03 三相可调电阻器或自配滑线变阻器。
6. MEL—02 三相芯式变压器。
4. 双踪示波器
5. 万用表

四. 实验方法

1. 触发电路实验

(1). 如图 1 所示，将 MCL-05 面板上左上角的同步电压输入接 MCL—18 的 U、V 端（如您选购的产品为 MCL—III、V，则同步电压输入直接与主控制屏的 U、V 输出端相连），“触发电路选择”拨向“锯齿波”。

(2). 三相调压器逆时针调到底，合上主电路电源开关，调节主控制屏输出电压 $U_{uv}=220v$ ，并打开 MCL—05 面板右下角的电源开关。用示波器观察各观察孔的电压波形，示波器的地线接于“7”端。以下均同。

先将控制电压 U_{ct} （即 U_g ）调到零，同时观察“1”、“2”孔的波形，了解锯齿波宽度和“1”点波形的关系。观察“3”~“5”孔波形及输出电压 U_{GK1} 的波形，调整电位器 RP1，使“3”的锯齿波刚出现平顶，记下各波形的幅值与宽度，比较“3”孔电压 U_3 与 U_5 的对应关系。

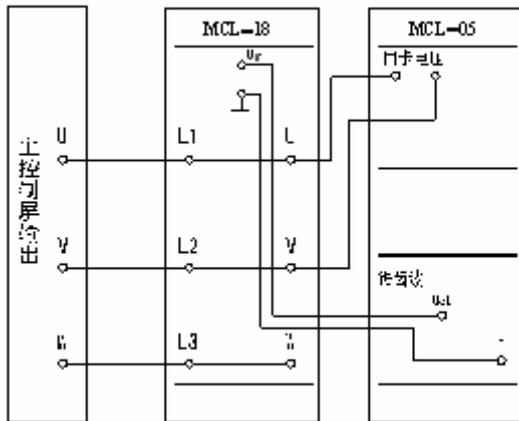


图 1. 锯齿波同步移相触发电路

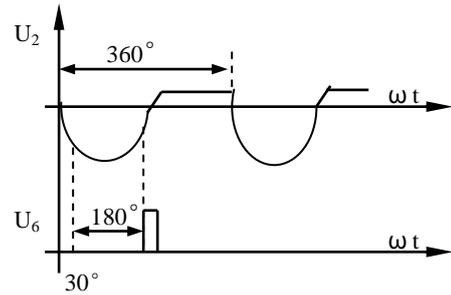


图 2. 脉冲移相范围

(3). 调节脉冲移相范围

将 MCL—18 的 “G” 输出电压调至 0V，即将控制电压 U_{ct} 调至零，用示波器观察 U_2 电压（即 “2” 孔）及 U_5 的波形，调节偏移电压 U_b （即调电位器 RP2），使 $\alpha=180^\circ$ ，其波形如图 2 所示。

调节 MCL—18 的给定电位器 “Ug” 输出电压，增加 U_{ct} ，观察脉冲的移动情况，要求 $U_{ct}=0$ 时， $\alpha=180^\circ$ ， $U_{ct}=U_{max}$ 时， $\alpha=30^\circ$ ，以满足移相范围 $\alpha=30^\circ\sim 180^\circ$ 的要求。

(4). 调节 U_{ct} ，使 $\alpha=60^\circ$ ，观察并记录 $U_1\sim U_5$ 及输出脉冲电压 U_{G1K1} ， U_{G2K2} 的波形，并标出其幅值与宽度。

(5). 用导线连接 “K1” 和 “K3” 端，接双踪示波器地线。用双踪示波器观察 “G 1” 和 “G 3” 的波形，调节电位器 RP3，使 “G 1” 和 “G 3” 间隔 180° 。

(6). 将 MCL—05（或 MCL—05A，以下均同）面板左上角的同步电压输入接 MCL—18 的 U、V 输出端，“触发电路选择” 拨向 “锯齿波”。实验原理图如图 3 所示。

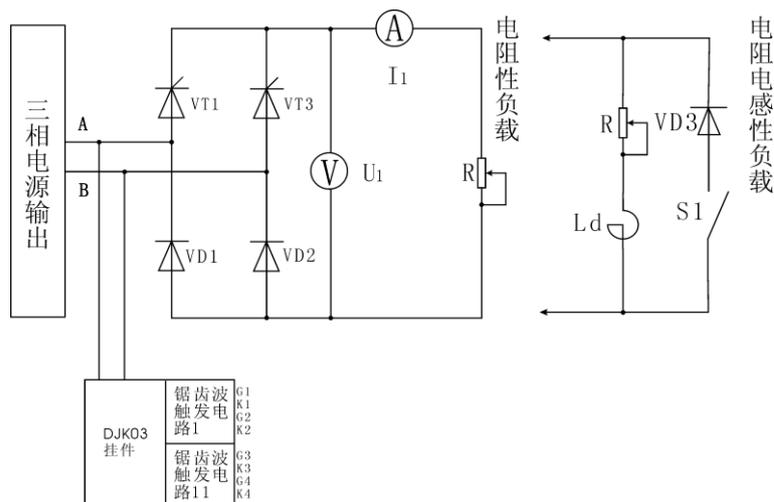


图 3. 实验原理图

三相调压器逆时针调到底，合上主电路电源开关，调节主控制屏输出电压 $U_w=220v$ ，并打开 MCL—05 面板右下角的电源开关。观察 MCL—05 锯齿波触发电路中各点波形是否正确，确定其输出脉冲可调的移相范围。并调节偏移电阻 RP2，使 $U_{ct}=0$ 时， $\alpha=150^\circ$ 。注意观察波形时，须断开 MEL-02 和 MCL-33

(或 MCL—53 组件) 的连接线。

2. 单相桥式晶闸管半控整流电路供电给电阻性负载:

按图 4 连接 MEL-02 和 MCL-33 (或 MCL—53 组件)。

(a) 把开关 S2 合向左侧连上负载电阻 R_d (可选择 900Ω 电阻并联, 最大电流为 0.8A), 并调节电阻负载至最大。

MCL-18 (或 MCL—III 型主控制屏, 以下均同) 的给定电位器 RP1 逆时针调到底, 使 U_{ct}=0。

三相调压器逆时针调到底, 合上主电路电源, 调节主控制屏输出 U_{uv}=220V。

调节 MCL-18 的给定电位器 RP1, 使 α =90°, 测取此时整流电路的输出电压 U_d=f(t), 输出电流 i_d=f(t) 以及晶闸管端电压 U_{VT}=f(t) 波形, 并测定交流输入电压 U₂、整流输出电压 U_d, 验证

$$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}。$$

若输出电压的波形不对称, 可分别调整锯齿波触发电路中 RP1, RP3 电位器。

(b) 采用类似方法, 分别测取 α =60°, α =30° 时的 U_d、i_d、U_{VT} 波形。

3. 单相桥式半控整流电路供电给电阻—电感性负载

(a) 把开关 S1 合向左侧接上续流二极管, 把开关 S2 合向右侧接上平波电抗器, 短接直流电动机电枢绕组 A1A2。

MCL-18 的给定电位器 RP1 逆时针调到底, 使 U_{ct}=0。

三相调压器逆时针调到底, 合上主电源, 调节主控制屏输出使 U_{uv}=220V。

(b) 调节 U_{ct}, 使 α =90°, 测取输出电压 U_d=f(t), 电感上的电流 i_L=f(t), 整流电路输出电流 i_d=f(t) 以及续流二极管电流 i_{VD}=f(t) 波形, 并分析三者的关系。调节电阻 R_d, 观察 i_d 波形如何变化, 注意防止过流。

(c) 调节 U_{ct}, 使 α 分别等于 60°、90° 时, 测取 U_d, i_L, i_d, i_{VD} 波形。

(d) 断开续流二极管, 观察 U_d=f(t), i_d=f(t)。

突然切断触发电路, 观察失控现象并记录 U_d 波形。若不发生失控现象, 可调节电阻 R_d。

4. 单相桥式半控整流电路接反电势负载

(1). 断开主电路, 改接直流电动机作为反电势负载 (断开直流电动机电枢绕组 A1A2 的短接线。) 短接平波电抗器, 短接负载电阻 R_d。

MCL-18 的给定电位器 RP1 逆时针调到底, 使 U_{ct}=0, 合上主电源, 调节主控制屏输出使 U_{uv}=220V。

调节 U_{ct}, 用示波器观察并记录不同 α 角时输出电压 U_d、电流 i_d 及电动机电枢两端电压 U_M 的波形, 记录相应的 U₂ 和 U_d 的波形。(可测取 α =60°, 90° 两点)。

2). 断开平波电抗器的短接线, 接上平波电抗器 (L=700mH), 重复以上实验并加以记录。

五. 实验报告

1. 整理, 描绘实验中记录的各点波形, 并标出幅值与宽度。
2. 总结锯齿波同步触发电路移相范围的调试方法, 移相范围的大小与哪些参数有关?
3. 如果要求 U_{ct}=0 时, α=90°, 应如何调整?
4. 讨论分析实际移相范围能否从 α=0° 调起及其它实验现象。
5. 绘出单相桥式半控整流电路供电给电阻负载, 电阻—电感性负载以及反电势负载情况下, 当 α =90° 时的 U_d、i_d、U_{VT}、i_{VD} 等波形图并加以分析。
6. 作出实验整流电路的输入—输出特性 U_d=f(U_{ct}), 触发电路特性 U_{ct}=f(α) 及 U_d/U₂=f(α)

曲线。

7. 分析续流二极管作用及电感量大小对负载电流的影响。

六. 注意事项

1. 双踪示波器有两个探头，可以同时测量两个信号，但这两个探头的地线都与示波器的外壳相连接，所以两个探头的地线不能同时接在某一电路的不同两点上，否则将使这两点通过示波器发生电气短路。为此，在实验中可将其中一根探头的地线取下或外包以绝缘，只使用其中一根地线。当需要同时观察两个信号时，必须在电路上找到这两个被测信号的公共点，将探头的地线接上，两个探头各接至信号处，即能在示波器上同时观察到两个信号，而不致发生意外。

2. 为保护整流元件不受损坏，需注意实验步骤：

- (1) 在主电路不接通电源时，调试触发电路，使之正常工作。

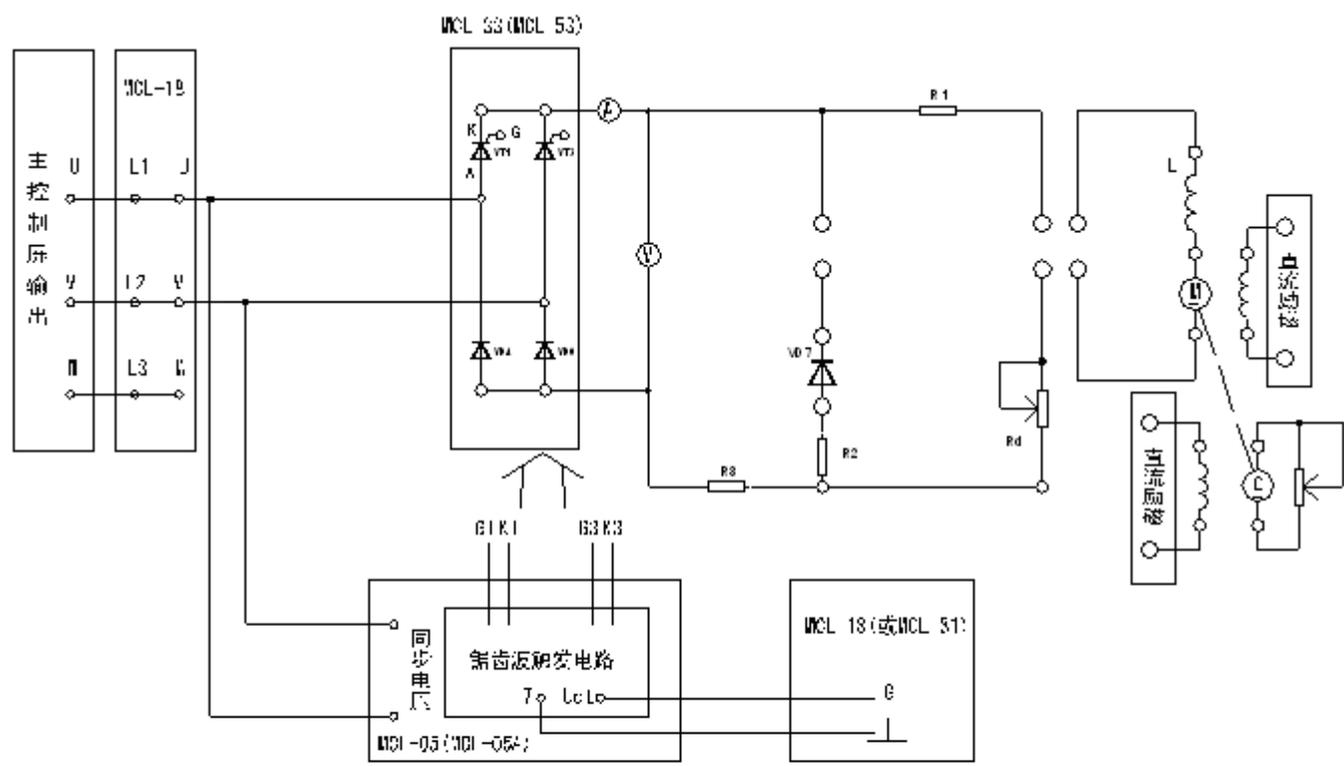
- (2) 在控制电压 $U_{ct}=0$ 时，接通主电路电源，然后逐渐加大 U_{ct} ，使整流电路投入工作。

- (3) 正确选择负载电阻或电感，须注意防止过流。在不能确定的情况下，尽可能选择较大的电阻或电感，然后根据电流值来调整。

- (4) 晶闸管具有一定的维持电流 I_H ，只有流过晶闸管的电流大于 I_H ，晶闸管才可靠导通。实验中，若负载电流太小，可能出现晶闸管时通时断，所以实验中，应保持负载电流不小于 100mA。

七. 思考

1. 在可控整流电路中，续流二极管 VD 起什么作用？在什么情况下需要接入？
2. 能否用双踪示波器同时观察触发电路与整流电路的波形？
3. 叙述可控硅的导通和关断的过程



- A: 直流电流表。
- V: 直流电压表。
- L: 平波电抗器, 可选择700mH
- VD7: 续流二极管。
- M: 直流电动机(MD03)。
- MCL-05的G1、K1和G2、K3分别接至MCL-33的VT1、VT2的控制极(G)、阴极(K)。
- Rd: 可选MEL-03的900欧瓷盘电阻并取或自制。
- R1、R2、R3: 电流测量取样电阻, R1采用MEL-04(90欧1.3W), R2和R3调至5欧左右(可小于5欧);或自配0.5欧、4W电F1
- G: 直流发电机或测功机

图4. 单相桥式半控整流

实验二 三相桥式全控整流及有源逆变电路实验

一. 实验目的

1. 熟悉 MCL-18, MCL-33 组件。
2. 熟悉三相桥式全控整流及有源逆变电路的接线及工作原理。
3. 了解集成触发器的调整方法及各点波形。

二. 实验内容

1. 三相桥式全控整流电路
2. 三相桥式有源逆变电路
3. 观察整流或逆变状态下, 模拟电路故障现象时的波形。

三. 实验线路及原理

实验原理图如图 1 所示。主电路由三相全控变流电路及作为逆变直流电源的三相不控整流桥组成。触发电路为数字集成电路, 可输出经高频调制后的双窄脉冲链。三相桥式整流及有源逆变电路的工作原理可参见“电力电子技术”的有关教材。

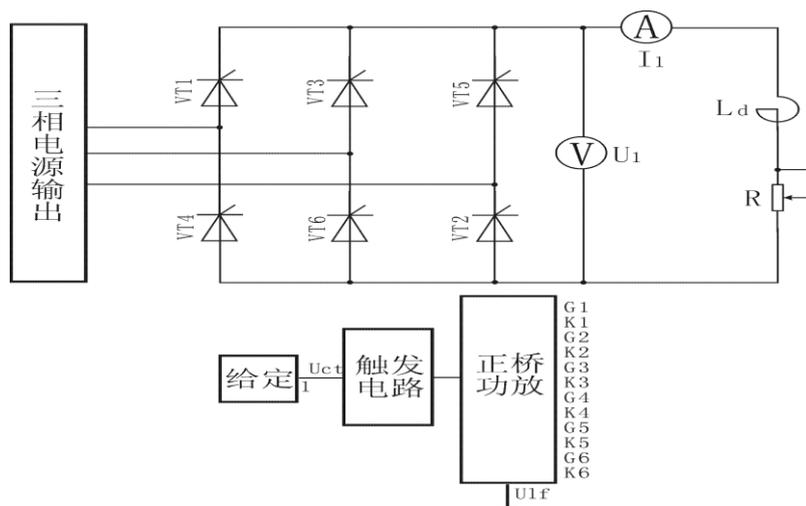


图 1. 实验原理图

四. 实验设备及仪器

1. MCL 系列教学实验台主控制屏。
2. MCL-18 组件 (适合 MCL-II) 或 MCL-31 组件 (适合 MCL-III)。
3. MCL-33 (A) 组件或 MCL-53 组件 (适合 MCL-II、III、V)
4. MEL-03 可调电阻器 (或滑线变阻器 1.8K, 0.65A)
5. MEL-02 芯式变压器
6. 二踪示波器
7. 万用表

五. 实验方法

1. 按图接线，未上主电源之前，检查晶闸管的脉冲是否正常。

(1) 打开 MCL-18 电源开关，给定电压有电压显示。

(2) 用示波器观察 MCL-33 (或 MCL-53, 以下同) 的双脉冲观察孔“1”至“6”，应有间隔均匀，相互间隔 60° 的幅度相同的双脉冲。该信号与 $\pm 15V$ 电源共地。

(3) 检查相序，用示波器观察“1”，“2”单脉冲观察孔，“1”脉冲超前“2”脉冲 60° ，则相序正确，否则，应调整输入电源。

(4) 用示波器观察每只晶闸管的控制极，阴极，应有幅度为 $1V-2V$ 的脉冲。

注：将面板上的 $Ub1f$ (当三相桥式全控变流电路使用 I 组桥晶闸管 $VT1\sim VT6$ 时) 接地，将 I 组桥式触发脉冲的六个开关均拨到“接通”。

(5) 将给定器输出 U_g 接至 MCL-33 面板的 U_{ct} 端，调节偏移电压 U_b ，在 $U_{ct}=0$ 时，使 $\alpha=150^\circ$ 。方法是，将同步电压“U”接入示波器第一通道，双脉冲观察孔“1”接入示波器第二通道，地线接 $\pm 15V$ 电源地，调节偏移电压 U_b ，使观察孔“1”第一个脉冲落后“U”相正弦波 180° 。偏移电压 U_b 即调好，此后不再调偏移电压 U_b 。

(6) 调 $\alpha=90^\circ$ 。方法是调节给定器输出 U_g 使观察孔“1”第一个脉冲落后“U”相正弦波 120° 。

2. 三相桥式全控整流电路

按图接线，S 拨向左边短接线端，将 R_d 调至最大 (450Ω)。

三相调压器逆时针调到底，合上主电源，调节主控制屏输出电压 U_{uv} 、 U_{vw} 、 U_{wu} ，从 $0V$ 调至 $220V$ 。

注：如您选购的产品为 MCL-III、V，无三相调压器，直接合上主电源。以下均同

调节 U_{ct} ，使 α 在 $30^\circ\sim 90^\circ$ 范围内，用示波器观察记录 $\alpha=30^\circ$ 、 60° 、 90° 时，整流电压 $u_d=f(t)$ ，晶闸管两端电压 $u_{VT}=f(t)$ 的波形，并记录相应的 U_d 和交流输入电压 U_2 数值。

3. 三相桥式有源逆变电路

断开电源开关后，将 S 拨向右边的不控整流桥，调节 U_{ct} ，使 α 仍为 150° 左右。

三相调压器逆时针调到底，合上主电源，调节主控制屏输出电压 U_{uv} 、 U_{vw} 、 U_{wu} ，从 $0V$ 调至 $220V$ 合上电源开关。

调节 U_{ct} ，观察 $\alpha=90^\circ$ 、 120° 、 150° 时，电路中 u_d 、 u_{VT} 的波形，并记录相应的 U_d 、 U_2 数值。

4. 电路模拟故障现象观察。在整流状态时，断开某一晶闸管元件的触发脉冲开关，则该元件无触发脉冲即该支路不能导通，观察并记录此时的 u_d 波形。

说明：如果采用的组件为 MCL-53 或 MCL-33 (A)，则触发电路是 KJ004 集成电路，具体应用可参考相关教材。

六. 实验报告

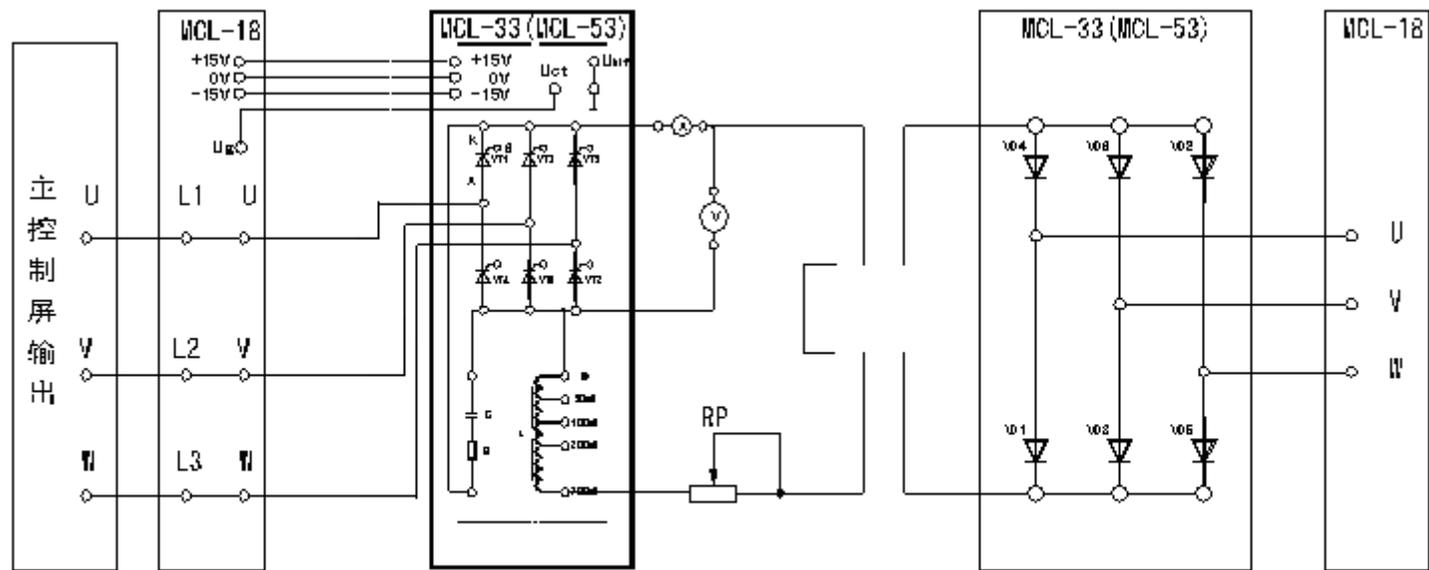
1. 画出电路的移相特性 $U_d=f(\alpha)$ 曲线

2. 作出整流电路的输入—输出特性 $U_d/U_2=f(\alpha)$

3. 画出三相桥式全控整流电路时， α 角为 30° 、 60° 、 90° 时的 u_d 、 u_{VT} 波形

4. 画出三相桥式有源逆变电路时， β 角为 150° 、 120° 、 90° 时的 u_d 、 u_{VT} 波形

4. 简单分析模拟故障现象



A: 直流电流表。

V: 直流电压表。

L: 平波电抗器, 可选择700mH

RP: 或为MEL-03的900欧瓷盘电阻并联, 或自配1.9K、0.65A双联滑线变阻器

图 2。三相桥式全控整流及有源逆变

实验三 直流斩波电路研究

一. 实验目的

1. 掌握直流斩波 Buck—Boost 变换器的工作原理、特点与电路组成。
2. 熟悉直流斩波 Buck—Boost 变换器连续与不连续工作模式的工作波形图。
3. 掌握直流斩波 Buck—Boost 变换器的调试方法。

二. 实验内容

1. 连接实验线路，构成一个实用的直流斩波 Buck—Boost 变换器。
2. 调节占空比，测出电感电流 i_L 处于连续与不连续临界状态时的占空比 D ，并与理论值相比较。
3. 将电感 L 增大一倍，测出 i_L 处于连续与不连续临界状态时的占空比 D ，并与理论值相比较。
4. 测出连续与不连续工作状态时的 V_{be} 、 V_{ce} 、 V_D 、 V_L 、 i_L 、 i_C 、 i_D 等波形。
5. 测出直流电压增益 $M=V_o/V_s$ 与占空比 D 的函数关系。
6. 测试输入、输出滤波环节分别对输入电流 i_s 与输出电流 i_o 影响。

三. 实验线路

见图 5—5。

四. 实验设备和仪器

1. MCL-08 直流斩波及开关电源实验挂箱
2. 万用表
3. 双踪示波器

五. 实验方法

1. 检查 PWM 信号发生器与驱动电路工作是否正常

连接有关线路，观察信号发生器输出与驱动电路的输出波形是否正常，如有异常现象，则先设法排除故障。

2. 电感 $L=1.6\text{mH}$ ，电感电流 i_L 处于连续与不连续临界状态时的占空比 D 测试

将“16”与“18”、“21”与“4”、“22”与“5”、“19”与“6”、“1”与“4”、“9”与“12”相连，即按照以下表格连线。

16	21	22	19	1	9
⇕	⇕	⇕	⇕	⇕	⇕
18	4	5	6	4	12

合上开关S1与S2、S3、S4，用示波器观察“7”与“13”（即 i_L ）之间波形，然后调节

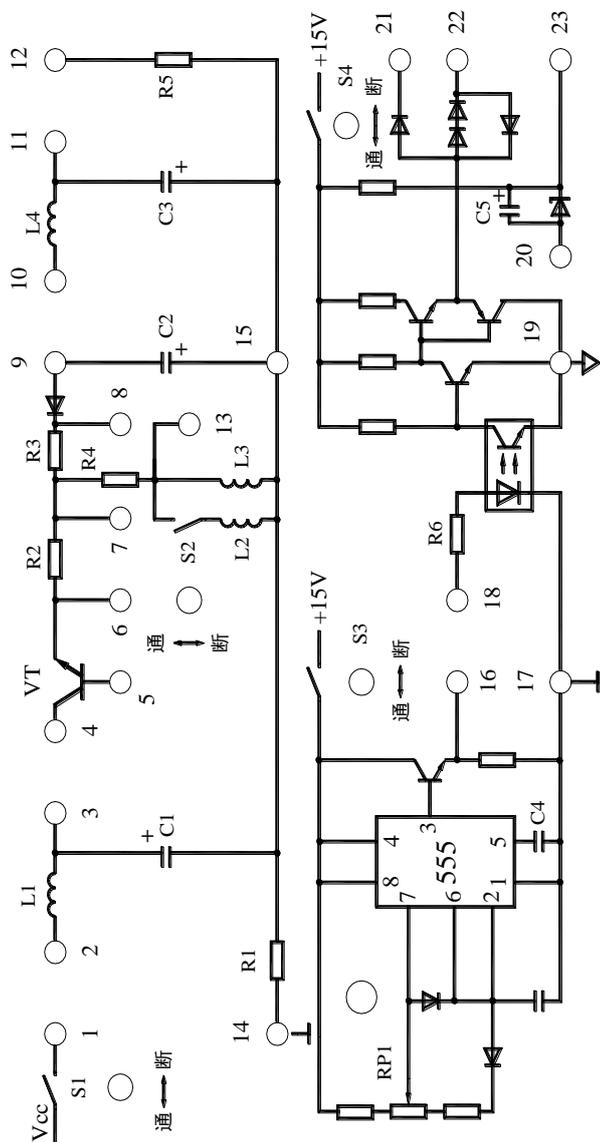


图5—5 BUCK-BOOST电路

RP1 使 i_L 处于连续与不连续的临界状态，记录这时候的占空比 D 与工作周期 T 。

3. $L=1.6\text{mH}$ ，测出处于连续与不连续临界工作状态时的 V_{be} 、 V_{ce} 、 V_D 、 i_L 、 i_C 、 i_D 等波形
 调节 RP1，使 i_L 处于连续与不连续临界工作状态，用示波器测出 GTR 基-射极电压 V_{be} 与集-射极电压 V_{ce} ；二极管 VD 阴极与阳极之间电压 V_D ；电感 L_3 两端电压 V_L ；电感电流 i_L ；三极管集电极电流 i_C 以及二极管电流 i_D 等波形。

4. $L=1.6\text{mH}$ ，测出连续工作状态时的 V_{be} 、 V_{ce} 、 V_D 、 i_L 、 i_C 、 i_D 等波形

调节 RP1，使 i_L 处于连续工作状态，用双踪示波器观察上述波形。

5. $L=1.6\text{mH}$ ，测出不连续工作状态时的 V_{be} 、 V_{ce} 、 V_D 、 i_L 、 i_C 、 i_D 等波形

调节 RP1，使 i_L 处于不连续工作状态，用双踪示波器观察上述波形。

6. $L=1.6\text{mH}$ ， i_L 处于连续与不连续临界状态时的占空比 D 测试

将开关 S2 断开，观察 i_L 波形，调节 RP1，使 i_L 处于连续与不连续的临界状态，记录这时候的占空比 D 与工作周期 T 。

7. $L=3.2\text{mH}$, 测出连续工作状态时的 V_{be} 、 V_{ce} 、 V_D 、 i_L 、 i_C 、 i_D 等波形

调节 $RP1$, 使 i_L 处于连续工作状态, 测试方法同前。

8. $L=3.2\text{mH}$, 测出不连续工作状态时的 V_{be} 、 V_{ce} 、 V_D 、 i_L 、 i_C 、 i_D 等波形

9. 测出 $M=V_o/V_s$ 与占空比 D 的函数关系

(1) $L=1.6\text{mH}$, 占空比 D 从最小到最大范围内, 测试 5~6 个 D 数据, 以及与此对应的输出电压 V_o 。

D						
V_o (V)						

(2) $L=3.2\text{mH}$, 测试方法同上。

D						
V_o (V)						

9. 输入滤波器功能测试

有与没有输入滤波器时, 电源电流 (即 15~14 两端) 波形测试。

10. 输出滤波器功能测试

有与没有输出滤波器时, 输出电流纹波测试。

五. 实验报告

1. 分别在 $L=1.6\text{mH}$ 与 3.2mH 条件下, 列出 i_L 连续与不连续临界状态时的占空比 D , 并与理论值相比较。

理论上 i_L 连续与断续的临界条件为 $\tau_{LC} = (1-D)^2/2$, 式中 $\tau_{LC} = L/RT$ 为连续与断续临界状态时的临界时间常数, 负载电阻 $R=300\Omega$, 工作周期 T 按实测数据。

2. 画出不同 L , 连续与断续时的 V_{be} 、 V_{ce} 、 V_D 、 i_L 、 i_C 、 i_D 等波形, 并与理论上的正确波形相比较。

3. 根据不同的 L 值, 按所测的 D , V_o 值计算出 M 值, 列出表格, 并画出曲线。连续工作状态时的直流电压增益表达式为 $M=D/(1-D)$, 请在同一图上画出该曲线, 并在图上注明连续工作与断续工作区间。

4. 试对 Buck-Boost 变换器的优缺点作一评述。

5. 试说明输入、输出滤波器在该变换中起何作用?

6. 实验的收获、体会与改进意见。

六. 思考题

试分析连续工作状态时, 输出电压 V_o 由哪个参数决定? 当断续工作状态时, V_o 又由哪些参数决定?

实验四 电力晶体管(GTR)特性与驱动电路研究

一. 实验目的

1. 掌握 GTR 对基极驱动电路的要求
2. 掌握一个实用驱动电路的工作原理与调试方法
3. 熟悉(GTR)的开关特性与二极管的反向恢复特性及其测试方法
5. 掌握 GTR 缓冲电路的工作原理与参数设计要求

二. 实验内容

1. 连接实验线路组成一个实用驱动电路
2. PWM 波形发生器频率与占空比测试
3. 光耦合器输入、输出延时时间与电流传输比测试
4. 贝克箝位电路性能测试
5. 过流保护电路性能测试
6. 不同负载时的 GTR 开关特性测试。
7. 不同基极电流时的开关特性测试。
8. 有与没有基极反压时的开关过程比较。
9. 并联冲电路性能测试。
10. 串联冲电路性能测试。
11. 二极管的反向恢复特性测试。

三. 实验线路

见图 5—1

四. 实验设备和仪器

1. MCL-07 电力电子实验箱
2. 双踪示波器
3. 万用表
6. 教学实验台主控制屏

五. 实验方法

1. 检查面板上所有开关是否均置于断开位置
2. PWM 波形发生器频率与占空比测试

(1) 开关 S1、S2 打向“通”，将脉冲占空比调节电位器 RP 顺时针旋到底，用示波器观察 1 和 2 点间的 PWM 波形，即可测量脉冲宽度、幅度与脉冲周期，并计算出频率 f 与占空比 D，填入表 5—1。

表 5—1

	幅度 (Vp-p)	宽度 (ms)	周期 (ms)	频率 f (kHz)	占空比 D
S2: 通					

RP: 右旋					
S2: 通 RP: 左旋					
S2: 断 RP: 右旋					
S2: 断 RP: 左旋					

(2) 将电位器 RP 左旋到底, 测出 f 与 D, 填入表 5—1。

(3) 将开关 S2 打向“断”, 测出这时的 f 与 D, 填入表 5—1。

(4) 电位器 RP 顺时针旋到底, 测出这时的 f 与 D, 填入表 5—1

(5) 将 S2 打在“断”位置, 然后调节 RP, 使占空比 D=0.2 左右。

3. 光耦合器特性测试

(1) 输入电阻为 R1=1.6KΩ时的开门, 关门延时时间测试

a. 将 GTR 单元的输入“1”与“6”分别与 PWM 波形发生器的输出“1”与“2”相连, 再分别连接 GTR 单元的“3”与“5”, “9”与“7”及“6”与“11”, 即按照以下表格的说明连线。

GTR: 1 ⇕	GTR: 6 ⇕	GTR: 3 ⇕	GTR: 9 ⇕	GTR: 6 ⇕
PWM: 1	PWM: 2	GTR: 5	GTR: 7	GTR: 11

b. GTR 单元的开关 S1 合向“”, 用双踪示波器观察输入“1”与“6”及输出“7”与“11”之间波形, 记录开门时间 t_{on} (含延迟时间 t_d 和下降时间 t_f) 以及关门时间 t_{off} (含储存时间 t_s 和上升时间 t_r), 填入表 5—2。

表 5—2 R=1.6k

t _d	t _f	t _{on}	t _s	t _r	t _{off}

(2) 输入电阻为 R2=150Ω时的开门, 关门延时时间测试

将 GTR 单元的“3”与“5”断开, 并连接“4”与“5”, 调节电位器 RP 顺时针旋到底 (使 RP 短接), 其余同上, 记录开门、关门时间, 填入表 5—3。

表 5—3 R=150

t _d	t _f	t _{on}	t _s	t _r	t _{off}

(3) 输入加速电容对开门、关门延时时间影响的测试

断开 GTR 单元的“4”和“5”, 将“2”、“3”与“5”相连, 即可测出具有加速电容时的开门、关门时间, 填入表 5—4。

表 5—4 接有加速电容

t _d	t _f	t _{on}	t _s	t _r	t _{off}

(4) 输入、输出电流传输比(CTR)测定

电流传输比定义为 $CTR = \text{输出电流} / \text{输入电流}$

GTR 单元的开关 S1 合向“5V”，S2 打向“通”，连接 GTR 的“6”和 PWM 波形发生器的“2”，分别在 GTR 单元的“4”和“5”以及“9”与“7”之间串入直流毫安表，电位器 RP 左旋到底，测量光耦输入电流 I_{in} 、输出电流 I_{out} 。

改变 RP(逐渐右旋)，分别测量 5-6 组光耦输入，输出电流，填入表 5—5。

表 5—5 输入、输出电流传输比(CTR)测定

I_{in} (mA)						
I_{out} (mA)						
CTR						

4. 驱动电路输入，输出延时时间测试

GTR 单元的开关 S1 合向“ $\square\square\square$ ”，将 GTR 单元的输入“1”与“6”分别与 PWM 波形发生器的输出“1”与“2”相连，再分别连接 GTR 单元的“3”与“5”，“9”与“7”及“6”与“11”、“8”，即按照以下表格的说明连线。

GTR : 1 ⇕ PWM: 1	GTR: 6 ⇕ PWM: 2	GTR: 3 ⇕ GTR: 5	GTR: 9 ⇕ GTR: 7	GTR: 6 ⇕ GTR: 11 ⇕ GTR: 8
------------------------	-----------------------	-----------------------	-----------------------	---------------------------------------

用双踪示波器观察 GTR 单元输入“1”与“6”及驱动电路输出“14”与“11”之间波形，记录驱动电路的输入，输出延时时间。

$t_d =$

5. 贝克箝位电路性能测试

(1) 不加贝克箝位电路时的 GTR 存贮时间测试。

GTR 单元的开关 S1 合向“ $\square\square\square$ ”，将 GTR 单元的输入“1”与“6”分别与 PWM 波形发生器的输出“1”与“2”相连，再分别连接 GTR 单元的“3”与“5”，“9”与“7”，“14”与“19”，“29”与“21”，以及 GTR 单元的“8”、“11”、“18”与主回路的“4”，GTR 单元的“22”与主回路的“1”，即按照以下表格的说明连线。

GTR : 1 ⇕ PWM: 1	GTR: 6 ⇕ PWM: 2	GTR: 3 ⇕ GTR: 2 ⇕ GTR: 5	GTR: 9 ⇕ GTR: 7	GTR: 8 ⇕ GTR: 11 ⇕ GTR: 18 ⇕ 主回路: 4	GTR: 14 ⇕ GTR: 19	GTR: 29 ⇕ GTR: 21	GTR: 22 ⇕ 主回路: 1
------------------------	-----------------------	--------------------------------------	-----------------------	---	-------------------------	-------------------------	------------------------

用双踪示波器观察基极驱动信号 u_b (“19”与“18”之间)及集电极电流 i_c (“22”与“18”之间)波形，记录存贮时间 t_s 。

$t_s =$

(2) 加上贝克箝位电路后的 GTR 存贮时间测试

在上述条件下，将 20 与 14 相连，观察与记录 t_s 的变化。

$t_s =$

6. 过流保护性能测试

在实验 5 接线的基础上接入过流保护电路，即断开“8”与“11”的连接，将“36”与“21”、“37”与“8”相连，开关 S3 放在“断”位置。

用示波器观察“19”与“18”及“21”与“18”之间波形，将 S3 合向“通”位置，(即减小比较器的比较电压，以此来模拟采样电阻 R8 两端电压的增大)，此时过流指示灯亮，并封锁驱动信号。

将 S3 放到断开位置，按复位按钮，过流指示灯灭，即可继续进行试验。

7. 不同负载时 GTR 开关特性测试

(1) 电阻负载时的开关特性测试

GTR 单元的开关 S1 合向“”，将 GTR 单元的输入“1”与“6”分别与 PWM 波形发生器的输出“1”与“2”相连，再分别连接 GTR 单元的“3”与“5”，“9”与“7”，“15”、“16”与“19”，“29”与“21”，以及 GTR 单元的“8”、“11”、“18”与主回路的“4”，GTR 单元的“22”与主回路的“1”，即按照以下表格的说明连线。

GTR : 1	GTR: 6	GTR: 3	GTR: 9	GTR: 8	GTR: 15	GTR: 29	GTR: 22
⇕	⇕	⇕	⇕	⇕	⇕	⇕	⇕
PWM: 1	PWM: 2	GTR: 5	GTR: 7	GTR: 11	GTR: 16	GTR: 21	主回路: 1
				⇕	⇕		
				GTR: 18	GTR: 19		
				⇕			
				主回路: 4			

用示波器观察，基极驱动信号 i_b (“19”与“18”之间)及集电极电流 i_c (“21”与“18”之间)波形，记录开通时间 t_{on} ，存贮时间 t_s 、下降时间 t_f 。

$t_{on} =$ μs , $t_s =$ μs , $t_f =$ μs

(2) 电阻、电感性负载时的开关特性测试

除了将主回路部分由电阻负载改为电阻、电感性负载以外(即将“1”与“22”断开而将“2”与“22”相连)，其余接线与测试方法同上。

$t_{on} =$ μs , $t_s =$ μs , $t_f =$ μs

8. 不同基极电流时的开关特性测试

(1) 基极电流较小时的开关过程

断开 GTR 单元“16”与“19”的连接，将基极回路的“15”与“19”相连，主回路的“1”与 GTR 单元的“22”相连，其余接线同上，测量并记录基极驱动信号 i_b (“19”与“18”之间)及集电极电流 i_c (“21”与“18”之间)波形，记录开通时间 t_{on} ，存贮时间 t_s 、下降时间 t_f 。

$t_{on} =$ μs , $t_s =$ μs , $t_f =$ μs

(2) 基极电流较大时的开关过程

将 GTR 单元的“15”与“19”的连线断开，再将“14”与“19”相连，其余接线与测试方法同上。

$$t_{on} = \quad \mu s, t_s = \quad \mu s, t_f = \quad \mu s$$

9. 有与没有基极反压时的开关过程比较

(1) 没有基极反压时的开关过程测试---与上述 2 (2) 测试方法相同。

(2) 有基极反压时的开关过程测试

a. 将 GTR 单元的“18”与“11”断开，并将“18”与“17”以及“12”与“11”相连，其余接线与测试方法同上。

$$t_{on} = \quad \mu s, t_s = \quad \mu s, t_f = \quad \mu s$$

b. 将 GTR 单元的“18”与“17”，“12”与“11”，“14”与“19”断开，将“15”、“16”与“19”、“18”与“11”相连，这时的基极反压系由电容 C₃ 两端电压产生，其余接线与测试方法同上。

$$t_{on} = \quad \mu s, t_s = \quad \mu s, t_f = \quad \mu s$$

10. 并联缓冲电路性能测试，基极电阻用 R_b，加贝克箱位电路

(1)、电阻负载（将主回路 1 与 22 相连）时，不同并联缓冲电路参数时的性能测试

a. 大电阻、小电容时的缓冲特性

将 GTR 单元的“26”、“27”与“31”相连，“32”与“18”相连，其余接线同上，测量并描绘“21”与“18”及“22”与“18”之间波形(包括 GTR 导通与关断时的波形，下同)。

b. 大电阻、大电容时的缓冲特性

断开 GTR 单元的“26”、“27”与“31”的相连，将“26”、“27”与“30”相连，测量并描绘“21”与“18”及“22”与“18”之间波形。

c. 小电阻大电容时的缓冲特性

断开 GTR 单元的“26”、“27”与“30”的相连，将“26”、“28”与“30”相连，测试方法同上。

d. 小电阻大电容时的缓冲特性

断开 GTR 单元的“26”、“28”与“30”的相连，将“26”、“28”与“31”相连，测试方法同上。

(2)、电阻、电感负载（主回路 2 与 22 相连）时，不同并联缓冲电路参数时的性能测试

a. 无并联缓冲时测量“21”与“18”及“22”与“18”之间波形。

B、加上并联缓冲，即将“26”、“28”与“30”相连，测量“21”与“18”及“22”与“18”之间波形。

11. 串联缓冲电路性能

(1) 较大串联电感时的缓冲特性

将主回路的“1”与 GTR 单元的“23”相连，“25”与“22”相连，其余接线同上，测量“21”与“18”及“22”与“18”之间波形。

(2) 较小串联电感时的缓冲特性

将 GTR 单元的“25”与“22”断开，将“24”与“22”相连，其余接线与测试方法同

上。

12. 二极管的反向恢复特性测试

(1) 快恢复二极管的恢复特性测试

将主回路的“1”与 GTR 单元的“22”相连，“26”与“34”，“33”、“27”与“30”相连，其余接线同上。观察电阻 R_{11} 两端的波形。

测试条件：调节 PWM 波形发生器的 RP，脉冲的占空比足够大，使 GTR 的关断时间比集-射极电压 U_{ce} (即 U_{c4}) 上升到稳态值的时间短，这样，在 GTR 关断过程中通过二极管对 C_4 的充电电流还未结束时，GTR 又一次导通，这时即可在采样电阻 R_{11} (为 1Ω) 两端观察到反向恢复过程。

(2) 普通二极管的恢复特性测试

断开 GTR 单元的“26”、“34”的相连，将“35”与“22”，“33”、“27”与“30”相连，其余接线与测试方法同上。

六. 实验报告

1. 画出 PWM 波形，列出 PWM 波形发生器 S2 在“通”与“断”位置时的频率 f 与最大，最小占空比。

2. 画出光耦合器在不同输入电阻及带有加速电容时的输入、输出延时时间曲线，探讨能缩短开门、关门延时时间的方法。

3. 列出光耦输入、输出电流，并画出电流传输比曲线。

4. 列出有与没有贝克箝位电路时的 GTR 存贮时间 t_s ，并说明使用贝克箝位电路能缩短存贮时间 t_s 的物理原因以及对贝克箝位二极管 V_1 的参数选择要求。

7. 试说明过流保护电路的工作原理。

7. 绘出电阻负载与电阻、电感负载时的 GTR 开关波形，并在图上标出 t_{on} 、 t_s 与 t_f ，并分析不同负载时开关波形的差异。

8. 绘出不同基极电流时的开关波形并在图上标出 t_{on} 、 t_s 与 t_f ，并分析理想基极电流的形状，探讨获得理想基极电流形的方法。

9. 绘出有与没有基极反压时的开关波形，分析及其对关断过程的影响。试分析实验中所采用的两种基极反压方案的优缺点，你能否设计另一种获得反压的方案。

10. 绘出不同负载，不同并联缓冲电路参数时的开关波形，对不同波形的形状从理论上加以说明。

11. 试分析串并联缓冲电路对 GTR 开关损耗的影响。

12. 绘出二极管的反向恢复特性曲线，并估算出反向恢复峰值电流值(电源电压为 15V， $R_{11}=1\Omega$)，试说明二极管 V_2 、 V_3 应选用具有何种恢复特性的二极管。

13. 实验的收获，体会与改进意见。

七. 思考题

1. 波形发生器中 $R_1=160\Omega$ ， $RP=1k\Omega$ ， $R_2=3k\Omega$ ， $C_1=0.022\mu F$ ， $C_2=0.22\mu F$ ，试对所测的 f 、 D_{max} 、 D_{min} 与理论值作一比较，能否分析一下两者相差的原因？

2. 实验中的光耦为 TLP521，试对实测的开门、关门延时时间与该器件的典型延时时间

作一比较，能否分析一下两者相差的原因。

3. 试比较波形发生器输出与驱动电路输出处的脉冲占空比，并分析两者相差的原因，你能否提出一种缩小两者差异的电路方案。

4. 根据实测的光耦电流传输比以及尽量短的开关门延时时间，请对 C_1 、 R_1 及 R_3 等参数作出选择。

5. 试说明如何正确选用并联缓冲电阻与电容，当 GTR 的最小导通时间已知为 $t_{on(min)}$ 时，你能否列出选择 R 、 C 应满足的条件？

6. GTR 的开关特性是指开通与关断过程中集电极电流与基极电流之间的相互变化关系，但因基极电流与集电极电流之间无共地点，因此无法用双踪示波器同时测试。实验中用基极电压来代替基极电流，试分析这种测试方法的优缺点，你能否设计出更好的测试方法？

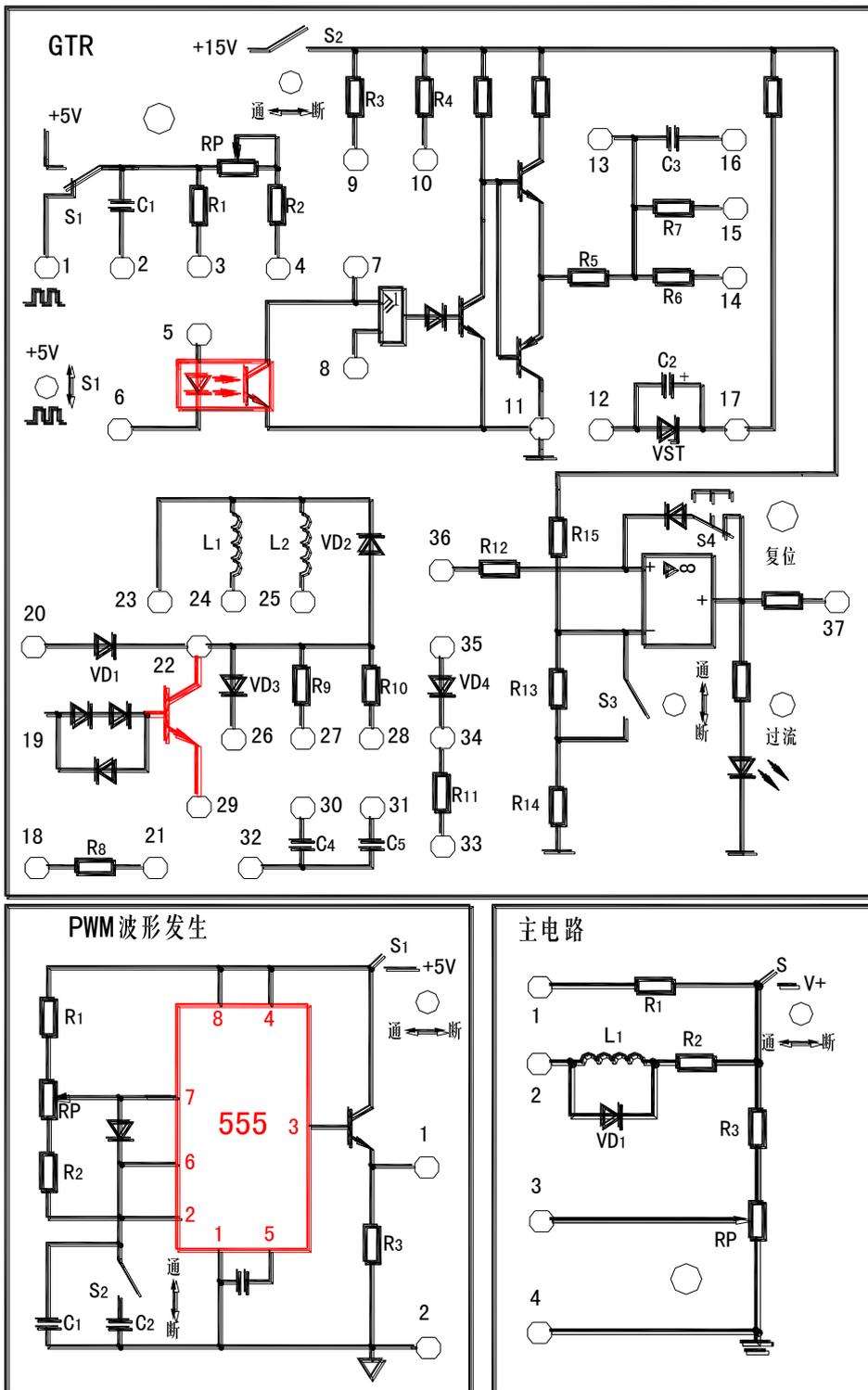


图5-1 GTR实验电路

实验五 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)特性与驱动电路研究

一. 实验目的

1. 熟悉 IGBT 主要参数与开关特性的测试方法。
2. 掌握混合集成驱动电路 EXB840 的工作原理与调试方法。

二. 实验内容

1. IGBT 主要参数测试。
2. EXB840 性能测试。
3. IGBT 开关特性测试。
4. 过流保护性能测试。

三. 实验设备和仪器

1. MCL-07 电力电子实验箱中的 IGBT 与 PWM 波形发生器部分。
2. 双踪示波器。
3. 毫安表
4. 电压表
5. 电流表
6. MCL 系列教学实验台主控制屏

四. 实验线路

见图 5—3

五. 实验方法

1. IGBT 主要参数测试

(1) 开启阈值电压 $V_{GS(th)}$ 测试

在主回路的“1”端与 IGBT 的“18”端之间串入毫安表，将主回路的“3”与“4”端分别与 IGBT 管的“14”与“17”端相连，再在“14”与“17”端间接入电压表，并将主回路电位器 RP 左旋到底。

将电位器 RP 逐渐向右旋转，边旋转边监视毫安表，当漏极电流 $I_D=1mA$ 时的栅源电压即为开启阈值电压 $V_{GS(th)}$ 。

读取 6—7 组 I_D 、 V_{GS} ，其中 $I_D=1mA$ 必测，填入表 5—8。

表 5—8

I_D (mA)				1			
V_{GS} (V)							

(2) 跨导 g_{FS} 测试

在主回路的“2”端与 IGBT 的“18”端串入安培表，将 RP 左旋到底，其余接线同上。将 RP 逐渐向右旋转，读取 I_D 与对应的 V_{GS} 值，测量 5-6 组数据，填入表 5—9。

表 5—9

I_D (mA)				1			
V_{gs} (V)							

(3) 导通电阻 R_{DS} 测试

将电压表接入“18”与“17”两端，其余同上，从小到大改变 V_{GS} ，读取 I_D 与对应的漏源电压 V_{DS} ，测量 5-6 组数据，填入表 5—10。

表 5—10

I_D (mA)				1			
V_{gs} (V)							

2. EXB840 性能测试

(1) 输入输出延时时间测试

IGBT 部分的“1”与“13”分别与 PWM 波形发生部分的“1”与“2”相连，再将 IGBT 部分的“10”与“13”、与门输入“2”与“1”相连，用示波器观察输入“1”与“13”及 EXB840 输出“12”与“13”之间波形，记录开通与关断延时时间。

$t_{on} =$, $t_{off} =$

(2) 保护输出部分光耦延时时间测试

将 IGBT 部分“10”与“13”的连线断开，并将“6”与“7”相连。用示波器观察“8”与“13”及“4”与“13”之间波形，记录延时时间。

(3) 过流慢速关断时间测试

接线同上，用示波器观察“1”与“13”及“12”与“13”之间波形，记录慢速关断时间。

(4) 关断时的负栅压测试

断开“10”与“13”的相连，其余接线同上，用示波器观察“12”与“17”之间波形，记录关断时的负栅压值。

(5) 过流阈值电压测试

断开“10”与“13”，“2”与“1”的相连，分别连接“2”与“3”，“4”与“5”，“6”与“7”，将主回路的“3”与“4”分别和“10”与“17”相连，即按照以下表格的说明连线。

IGBT: 17 ⇕ 主回路: 4	IGBT: 10 ⇕ 主回路: 3	IGBT: 4 ⇕ IGBT: 5	IGBT: 6 ⇕ IGBT: 7	IGBT: 2 ⇕ IGBT: 3	IGBT: 12 ⇕ IGBT: 14
-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	---------------------------

RP 左旋到底，用示波器观察“12”与“17”之间波形，将 RP 逐渐向右旋转，边旋转边监视波形，一旦该波形消失时即停止旋转，测出主回路“3”与“4”之间电压值，该值即为过流保护阈值电压值。

(6) 4 端外接电容器 C_1 功能测试——供教师研究用

EXB840 使用手册中说明该电容器的作用是防止过流保护电路误动作（绝大部分场合不需要电容器）。

- a. C1 不接，测量“8”与“13”之间波形。
- b. “9”与“13”相连时，测量“8”与“13”之间波形，并与上述波形相比较。

3. 开关特性测试

(1) 电阻负载时开关特性测试

将“1”与“13”分别与波形发生器“1”与“2”相连，“4”与“5”，“6”与“7”，“2”与“3”，“12”与“14”，“10”与“18”，“17”与“16”相连，主回路的“1”与“4”分别和 IGBT 部分的“18”与“15”相连。即按照以下表格的说明连线。

IGBT: 1 ⇕ PWM: 1	IGBT: 13 ⇕ PWM: 2	IGBT: 4 ⇕ IGBT: 5	IGBT: 6 ⇕ IGBT: 7	IGBT: 2 ⇕ IGBT: 3	IGBT: 12 ⇕ IGBT: 14
IGBT: 17 ⇕ IGBT: 16	IGBT: 10 ⇕ IGBT: 18	IGBT: 15 ⇕ 主回路: 4	IGBT: 18 ⇕ 主回路: 1		

用示波器分别观察“8”与“15”及“14”与“15”的波形，记录开通延迟时间。

(2) 电阻，电感负载时开关特性测试

将主回路“1”与“18”的连线断开，再将主回路“2”与“18”相连，用示波器分别观察“8”与“15”及“16”与“15”的波形，记录开通延迟时间。。

(3) 不同栅极电阻时开关特性测试

将“12”与“14”的连线断开，再将“11”与“14”相连，栅极电阻从 $R_5=3k\Omega$ 改为 $R_4=27\Omega$ ，其余接线与测试方法同上。

4. 并联缓冲电路作用测试

- (1) 电阻负载，有与没有缓冲电路时观察“14”与“17”及“18”与“17”之间波形。

(2) 电阻，电感负载，有与没有缓冲电路时，观察波形同上。

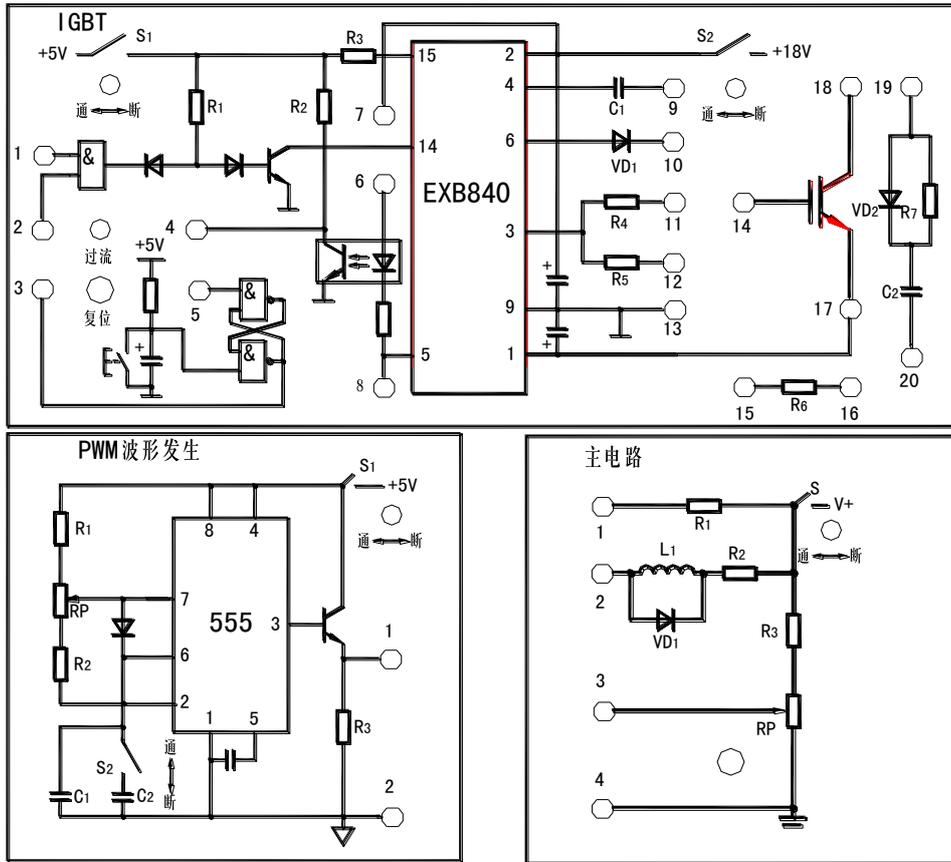


图5-3 IGBT实验电路

5. 过流保护性能测试，栅极电阻用 R_4

在上述接线基础上，将“4”与“5”，“6”与“7”相连，观察“14”与“17”之间波形，然后将“10”与“18”之间连线断开，并观察驱动波形是否消失，过流指示灯是否发亮，待故障消除后，撤复位按钮即可继续进行试验。

六. 实验报告

1. 根据所测数据，绘出 IGBT 的主要参数的表格与曲线。
2. 绘出输入、输出及对光耦延时以及慢速关断等波形，并标出延时与慢速关断时间。
3. 绘出所测的负栅压值与过流阈值电压值。
4. 绘出电阻负载，电阻电感负载以及不同栅极电阻时的开关波形，并在图上标出 t_{ON} 与 t_{OFF} 。
5. 绘出电阻负载与电阻、电感负载有与没有并联缓冲电路时的开关波形，并说明并联缓冲电路的作用。
6. 过流保护性能测试结果，并对该过流保护电路作出评价。
7. 实验的收获、体会与改进意见。

七. 思考题

1. 试对由 EXB840 构成的驱动电路的优缺点作出评价。
2. 在选用二极管 V_1 时, 对其参数有何要求? 其正向压降大小对 IGBT 的过流保护功能有何影响?
3. 通过 MOSFET 与 IGBT 器件的实验, 请你对两者在驱动电路的要求, 开关特性与开关频率, 有、无反并联寄生二极管, 电流、电压容量以及使用中的注意事项等方面作一分析比较。