

运动控制系统

实验指导书

李宁 汪贵平 编

长安大学电控学院

自动化与交通控制工程实验教学中心

2009年6月

目 录

第一部分 MCL 系统挂箱介绍和使用说明	1
一 MCL—18 挂箱	1
二 MCL-33 挂箱	6
第二部分 直流调速系统实验	7
实验一 晶闸管直流调速系统参数和环节特性的测定	7
实验二 晶闸管直流调速系统主要单元调试	14
实验三 双闭环晶闸管不可逆直流调速系统	18
实验四 逻辑无环流可逆直流调速系统	22
实验五 双闭环可逆直流脉宽调速系统	27
第三部分 交流调速系统实验	33
实验一 双闭环三相异步电动机调压调速系统	33
第四部分 仿真实验分析	37
一 几种典型的电路仿真软件包介绍	37
二 MATLAB/Simulink 在运动控制系统中的仿真应用	40

第一部分 MCL 系统挂箱介绍和使用说明

一 MCL—18 挂箱

MCL—18 由 G (给定), 零速封锁器 (DZS), 速度变换器 (FBS), 转速调节器 (ASR), 电流调节器 (ACR), 过流过压保护等部份组成。

1. G (给定):

原理图如图 1-1。

它的作用是得到下列几个阶跃的给定信号:

- (1) 0V 突跳到正电压, 正电压突跳到 0V;
- (2) 0V 突跳到负电压, 负电压突跳到 0V;
- (3) 正电压突跳到负电压, 负电压突跳到正电压。

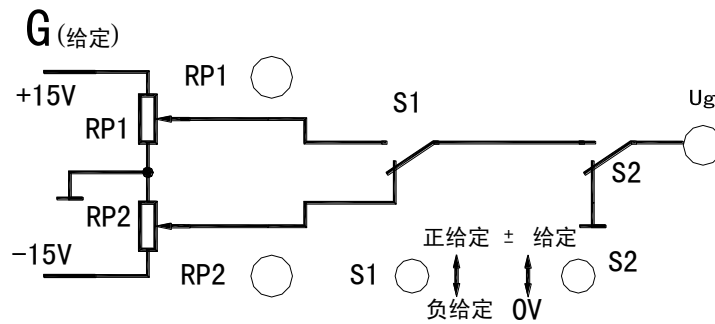


图1-1 给定原理图

正负电压可分别由 RP1、RP2 两多圈电位器调节大小 (调节范围为 0~±13V 左右)。数值由面板右边的数显窗读出。

只要依次扳动 S1、S2 的不同位置即能达到上述要求。

- (1) 若 S1 放在“正给定”位, 扳动 S2 由“零”位到“给定”位即能获得 0V 突跳到正电压的信号, 再由“给定”位扳到“零”位能获得正电压到 0V 的突跳;
- (2) 若 S1 放在“负给定”位, 扳动 S2, 能得到 0V 到负电压及负电压到 0V 的突跳;
- (3) S2 放在“给定”位, 扳动 S1, 能得到正电压到负电压及负电压到正电压的突跳。

使用注意事项: 给定输出有电压时, 不能长时间短路, 特别是输出电压较高时, 否则容易烧坏限流电阻。

2. FBC+FA+FT (电流变送器与过流过压保护):

此单元有三种功能: 一是检测电流反馈信号, 二是发出过流信号, 三是发出过压信号。电路图为 1-2。

(1) 电流变送器

电流变送器适用于可控硅直流调速装置中, 与电流互感器配合, 检测可控硅变流器交流进线电流, 以获得与变流器电流成正比的直流电压信号, 零电流信号和过电流逻辑信号等。

电流互感器的输出接至输入 TA1, TA2, TA3, 反映电流大小的信号经三相桥式整流电路整流后加至 9R1、9R2、VD7 及 RP1、9R3、9R20 组成的各支路上, 其中:

- a. 9R2 与 VD7 并联后再与 9R1 串联, 在其中点取零电流检测信号。
- b. 将 RP1 的可动触点输出作为电流反馈信号, 反馈强度由 RP1 进行调节。

c. 将可动触点 RP2 与过流保护电路相联，输出过流信号，可调节过流动作电流的大小。

(2) 过流保护 (FA)

当主电路电流超过某一数值后(2A 左右), 由 9R3, 9R20 上取得的过流信号电压超过运算放大器的反向输入端, 使 D 触发器的输出为高电平, 使晶体三极管 V 由截止变为导通, 结果使继电器 K 的线圈得电, 继电器 K 由释放变为吸引, 它的常闭触点接在主回路接触器的线圈回路中, 使接触器释放, 断开主电路。并使发光二极管亮, 作为过流信号指示, 告诉操作者已经过流跳闸。

SA 为解除记忆的复位按钮, 当过流动作后, 如过流故障已经排除, 则须按下以解除记忆, 恢复正常工作。

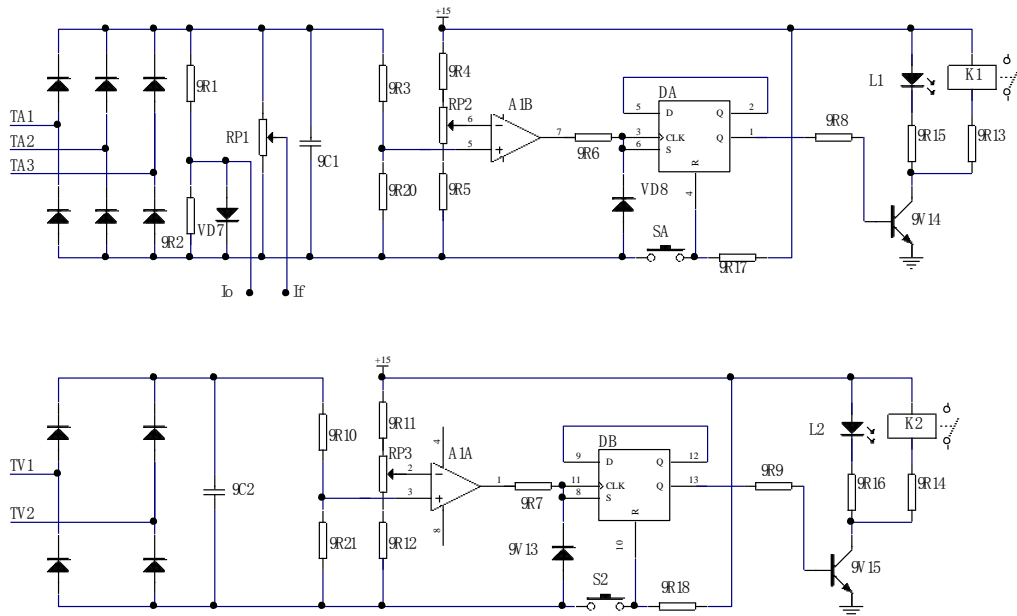


图 1-2 电流变送器与过流保护原理图

3. 零速封锁器 (DZS)

零速封锁器的作用是当调速系统处于静车状态, 即速度给定电压为零, 同时转速也确为零时, 封锁调节系统中的所有调节器, 以避免静车时各放大器零漂引起可控硅整流电路有输出使电机爬行的不正常现象。原理电路如图 1—3 所示。

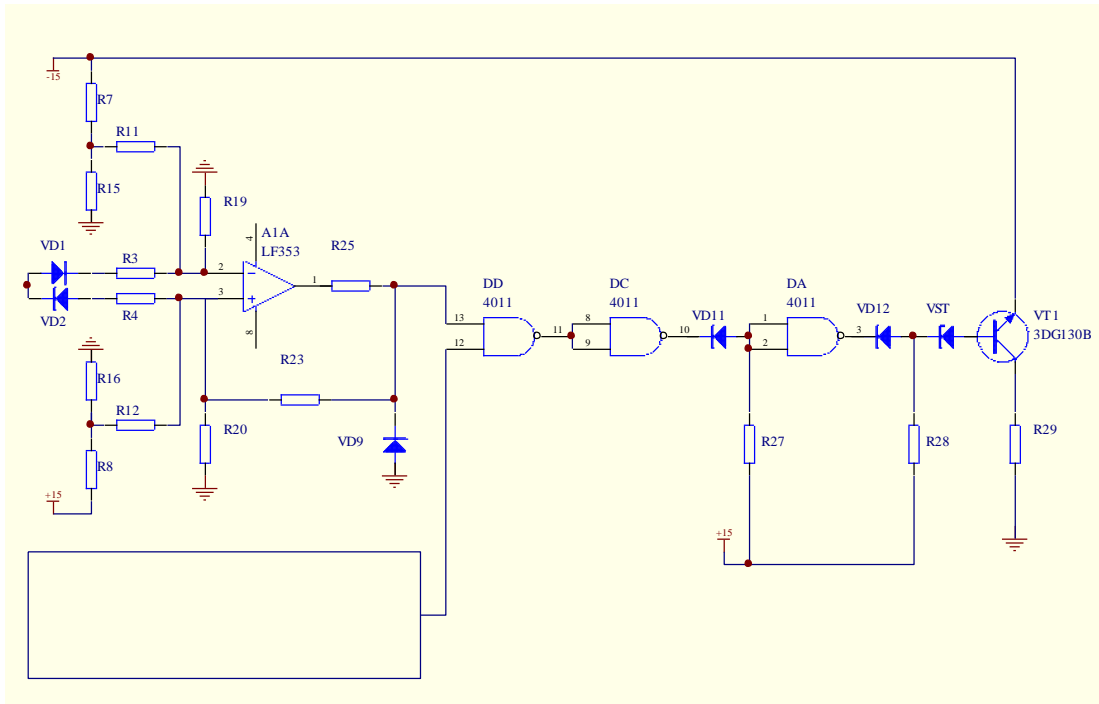


图 1—3 零速封锁器

它的总输入输出关系是：

- (1) 当 1 端和 2 端的输入电压的绝对值都小于 0.07 V 左右时，则 3 端的输出电压应为 0V；
- (2) 当 1 端和 2 端的输入电压绝对值或者其中之一或者二者都大于 0.2V 时，其 3 端的输出电压应为 -15V；
- (3) 当 3 端的输出电压已为 -15V，的电压绝对值都小于 0.07V，使 3 端电压 0V 时，需要有 100 毫秒的延时。

3 端为 0V 时输入到各调节器反馈网管，使其导通，调节器反馈网络短路而被 15V 时输入到上述场效应管使其夹断，而原理如下：

它是由两个山形电平检测器和开关

(1) DZS 前半部分别由线性集成电路 B 组成二个山形电平检测器，山形电平极特性如图 1—4 所示，输入电压是指 1 或 2 (S3 放在封锁位)，输出电压是指 4 或 5 上得到的电压。调整参数到输出电压突跳的几个输入电压为：

$$U_a = -0.2V \quad U_b = -0.07V \quad U_c = +0.07V \quad U_d = +0.2V$$

输出正向电压无限幅，约为 +12V，输出负向电压用二极管 VD₉ 和 VD₁₀ 箝位到 -0.7V。

(2) DZS 的后关部为开关延时电路

(a) 当 1 和 2 端电压绝对值均小于 0.07V，则 4 和 5 得到的电压都为 +15V，高电平为“1”态，输入单与门 4011，其输出 10 脚也为“1”态，二极管 VD₁₁ 截止，这样单与非门的输入为“1”态，输出 3 脚为“0”态，VD₁₂ 导通，使稳压管 VST 不能击穿，所以三极管 VT1 截止，从而 3 端输出为 0V。

(b) 当 1 和 2 端电压绝对值或其中之一或二者都大于 0.2V 时，则在 4 和 5 上或者 4 为 -0.7V，或者 5 为 -0.7V，或者 4、5 均为 -0.7V，低电平为“0”态，三种情况输入 D：C，其输

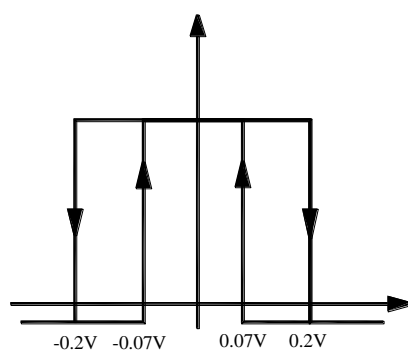


图1-4 电平检测器输入输出特性

后因 1 端和 2 端由 -15V 变为

络中的场效应封锁，3 端为一解除封锁。具体

延时电路组成。

路 A1：A 和 A1：测器的输入输出端送入的电压

出都为“0”态，VD₁₁导通，接0V，D:A输入为“0”态，其输出为“1”态，使VD₁₂截止，稳压管VST在30V的电压作用下而击穿，VT1饱和导通，可使3端输出为-15V。

(c) 当已在(b)的情况，3端子输出为-15V，此时D:C的输出为0V，D:A上输入电压接近0V。若要回到(a)的情部，则D:C的输出先由“0”态变成“1”态，VD₁₁截止，D:A上输入上电压应为+15V，但电容C₅二端电压不能突变，+15V电源通过R₂₇对C₅充电，C₅电压逐步上升，上升到一定数值后D:A的输出由“1”态变为“0”态，从而使3端输出为0V，所以3端由-15V变为0V有一延时时间，其延时长短取决于R₂₇C₅的充电回路时间常数。

(d) 钮子开关S3有二个位置，放在“封锁位”，用在调速系统正常工作的情况，即为上述分析情况，放在“解除位”，A1:A组成的山形电平检测器输入总是+15V，3端子电位总是-15V，使各调节器解除封锁，以便单独调试调节器用。

4. 电源输入输出端:

面板下部的L1、L2、L3三接线柱表示三相电源的输入，U、V、W表示电源输出端。在进行实验时，调压器的输出端接到L1、L2、L3，U、V、W接到可控硅或电机，在L1、U，L2、V，L3、W间接有电流互感器，L1、L2间接有电压互感器，当电流过大或电压过高时，过流保护和过压保护动作。

使用注意事项: 接到可控硅的电压必须从U、V、W引出，否则过流保护和过压保护不起作用。

5. FBS (速度变换器)

速度变换器(FBS)用于转速反馈的调速系统中，将直流测速发电机的输出电压变换成适用于控制单元并与转速成正比的直流电压，作为速度反馈。

其原理图如图1—5所示。

使用时，将测速发电机的输出变换器的输入端1和2。分两路

(1) 一路经电位器RP2至表(0-±2000n/s)已装在电机导轨

(2) 另一路经电阻及电位器RP中心抽头输出，作为转速反馈强度由电位器RP的中心抽头

电位器RP输出的信号，同时作为零速封锁反映转速的电平信号。

元件RP装在面板上。

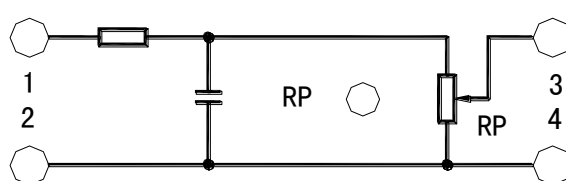


图1-5 速度变换器

出端接至速度输出。转速表，转速上。器RP，由电位反馈信号，反进行调节，由

6. ASR (速度调节器)

速度调节器ASR的功能是对给定和反馈两个输入量进行加法，减法，比例，积分和微分等运算，使其输出按某一规律变化。

它由运算放大器，输入与反馈网络及二极管限幅环节组成。其原理图如图1-6所示。

转速调节器ASR也可当作电压调节器AVR来使用。

速度调节器采用电路运算放大器，它具有两个输入端，同相输入端和倒相输入端，其

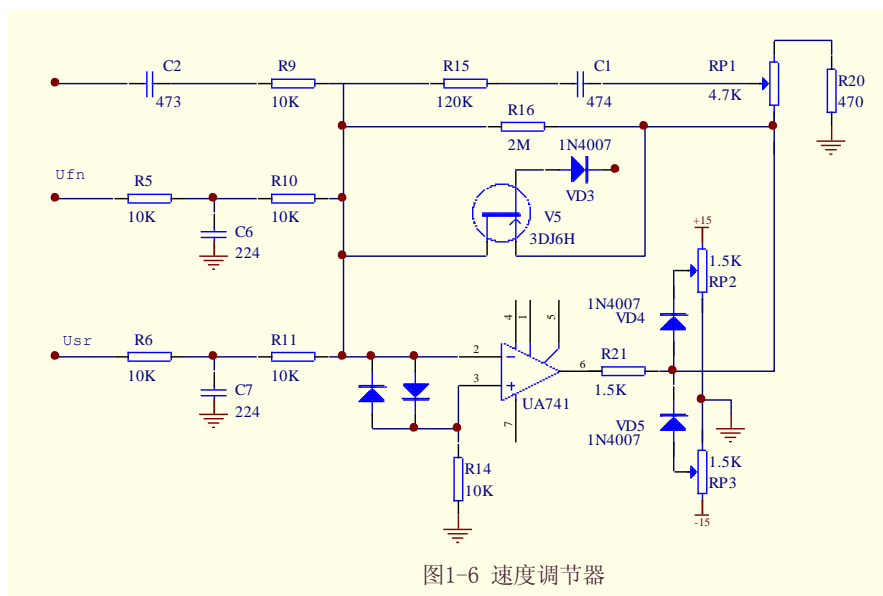


图1-6 速度调节器

输出电压与两个输入端电压之差成正比。电路运算放大器具有开环放大倍数大，零点漂移小，线性度好，输入电流极小，输出阻抗小等优点，可以构成理想的调节器。图 1-7 中，由二极管 VD4，VD5 和电位器 RP2，RP3 组成正负限幅可调的限幅电路。由 C2，R9 组成反馈微分校正网络，有助于抑制振荡，减少超调，R15，C1 组成速度环串联校正网络。场效应管 V5 为零速封锁电路，当 4 端为 0V 时 VD5 导通，将调节器反馈网络短接而封锁，4 端为 -13V 时，VD5 夹断，调节器投入工作。RP1 为放大系数调节电位器。

元件 RP1，RP2，RP3 均安装在面板上。电容 C1 两端在面板上装有接线柱，电容 C2 两端也装有接线柱，可根据需要外接电容。

7. ACR（电流调节器）

电流调节器适用于可控制传动系统中，对其输入信号（给定量和反馈量）时进行加法、减法、比例、积分、微分，延时等运算或者同时兼做上述几种运算。以使其输出量按某种预定规律变化。它是由下述几部分组成：运算放大器，两极管限幅，互补输出的电流放大级、输入阻抗网络、反馈阻抗网络等。

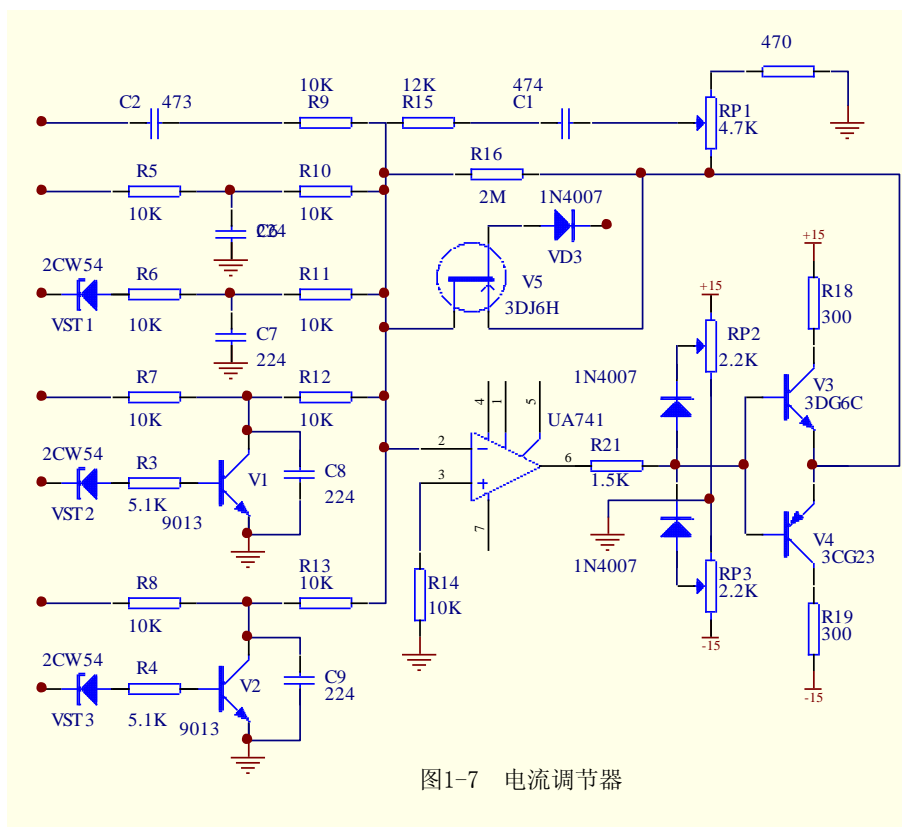


图1-7 电流调节器

电流调节器与速度调节器相比，增加了 4 个输入端，其中 2 端接过流推β信号，来自电流变换器的过流信号 U_{β} ，当该点电位高于某值时，VST1 击穿，正信号输入，ACR 输出负电压使触发电路脉冲后移。 U_z 、 U_F 端接逻辑控制器的相应输出端，当这二端为高电平时，三极管 V1、V2 导通将 U_{gt} 和 U_{gi} 信号对地短接，用于逻辑无环流可逆系统。

晶体管 V_3 和 V_4 构成互补输出的电流放大级，当 V_3 、 V_4 基极电位为正时， V_4 管（PNP 型晶体管）截止， V_3 管和负载构成射极跟随器。如 V_3 、 V_4 基极电位为负时， V_3 管（NPN 型晶体管）截止， V_4 管和负载构成射极跟随器。接在运算放大器输入端前面的阻抗为输入阻抗网络。改变输入和反馈阻抗网络参数，就能得到各种运算特性。

元件 RP1、RP2、RP3 装在面板上，C1、C2 的数值可根据需要，由外接电容来改变。

二 MCL-33 挂箱

MCL—33 由脉冲控制及移相，双脉冲观察孔，一组可控硅，二组可控硅及二极管，RC 吸收回路，平波电抗器 L 组成。

本实验台提供相位差为 60° ，经过调制的“双窄”脉冲（调制频率大约为 3~10KHz），触发脉冲分别由两路功放进行放大，分别由 U_{b1f} 和 U_{b2f} 进行控制。当 U_{b2f} 接地时，第一组脉冲放大电路进行放大。当 U_{b1f} 接地时，第二组脉冲放大电路进行工作。脉冲移相由 U_{ct} 端的输入电压进行控制，当 U_{ct} 端输入正信号时，脉冲前移， U_{ct} 端输入负信号时，脉冲后移，移相范围为 10° — 160° 。偏移电压调节电位器 RP 调节脉冲的初始相位，不同的实验初始相位要求不一样。

双脉冲观察孔输出相位差为 60° 的双脉冲，同步电压观察孔，输出相电压为 30V 左右的同步电压，用双踪示波器分别观察同步电压和双脉冲，可比较双脉冲的相位。

使用注意事项：单双脉冲及同步电压观察孔在面板上俱为小孔，仅能接示波器，不能输入任何信号。

1. 脉冲控制。

面板上部的六档直键开关控制接到可控硅的脉冲，1、2、3、4、5、6 分别控制可控硅 VT1、VT2、VT3、VT4、VT5、VT6 的触发脉冲，当直键开关按下时，脉冲断开，弹出时脉冲接通。

2. 一桥可控硅由六只 5A800V 组成。

3. 二桥可控硅由六只 5A800V 构成，另有六只 5A800V 二极管。

4. RC 吸收回路可消除整流引起的振荡。当做调速实验时需接在整流桥输出端。平波电抗器可作为电感性负载电感使用，电感分别为 50mH、100mH、200mH、700mH，在 1A 范围内基本保持线性。

使用注意事项：

外加触发脉冲时，必须切断内部触发脉冲。

第二部分 直流调速系统实验

实验一 晶闸管直流调速系统参数和环节特性的测定

一. 实验目的

1. 了解电力电子及电气传动教学实验台的结构及布线情况。
2. 熟悉晶闸管直流调速系统的组成及其基本结构。
3. 掌握晶闸管直流调速系统参数及反馈环节测定方法。

二. 实验内容

1. 测定晶闸管直流调速系统主电路电阻 R
2. 测定晶闸管直流调速系统主电路电感 L
3. 测定直流电动机—直流发电机—测速发电机组（或光电编码器）的飞轮惯量 GD^2
4. 测定晶闸管直流调速系统主电路电磁时间常数 T_d
5. 测定直流电动机电势常数 C_e 和转矩常数 C_M
6. 测定晶闸管直流调速系统机电时间常数 T_M
7. 测定晶闸管触发及整流装置特性 $U_d=f(U_{ct})$
8. 测定测速发电机特性 $U_{TG}=f(n)$

三. 实验系统组成和工作原理

晶闸管直流调速系统由三相调压器，晶闸管整流调速装置，平波电抗器，电动机——发电机组等组成。

本实验中，整流装置的主电路为三相桥式电路，控制回路可直接由给定电压 U_g 作为触发器的移相控制电压，改变 U_g 的大小即可改变控制角，从而获得可调的直流电压和转速，以满足实验要求。

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。
3. MCL—33(A)组件。
4. 电机导轨及测速发电机、直流发电机
5. MEL—03 三相可调电阻器(或自配滑线变阻器 450Ω, 1A)
6. 双踪示波器或数字式示波器
7. 万用表
8. 直流电动机 M03

五. 注意事项

1. 由于实验时装置处于开环状态, 电流和电压可能有波动, 可取平均读数。
2. 为防止电枢过大电流冲击, 每次增加 U_g 须缓慢, 且每次起动电动机前给定电位器应调回零位, 以防过流。
3. 电机堵转时, 大电流测量的时间要短, 以防电机过热。

六. 实验方法

1. 电枢回路电阻 R 的测定

电枢回路的总电阻 R 包括电机的电枢电阻 R_a , 平波电抗器的直流电阻 R_L 和整流装置的内阻 R_n , 即 $R=R_a+R_L+R_n$

为测出晶闸管整流装置的电源内阻, 可采用伏安比较法来测定电阻, 其实验线路如图 2-1 所示。**此时安培表用 2A 档。调试时电流不得超过 1A。**

将变阻器 RP (可采用两只 900Ω 电阻并联) 接入被测系统的主电路, 并调节电阻负载至最大。测试时电动机不加励磁, 并使电机堵转。

MCL-18 的给定电位器 $RP1$ 逆时针调到底, 使 $U_{ct}=0$, 即 $\alpha=150^\circ$ 。MCL-33 的 U_{blf} 上下短接, 控制左边的整流桥组, 示波器观测脉冲输出电压波形, 此时输出电压大小为 0。

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 $U_{uv}=220V$ 。

调节 U_g 使整流装置输出电压 $U_d=(30\sim70)\%U_{ed}$ (调节 U_g 使 U_d 大小为 110V, U_{ed} 为额定电压, 电机铭牌上标有), 然后调整 RP 使电枢电流为 $(80\sim90)\%I_{ed}$ (调电阻时, 由于单个电阻流过电流不得大于 0.5A, 并联电阻流过电流不得大于 1A), 读取电流表 A 和电压表 V 的数值为 I_1, U_1 , 则此时整流装置的理想空载电压为

$$U_{do}=I_1R+U_1$$

调节 RP , 使电流表 A 的读数为 40% I_{ed} (调并联电阻)。在 U_d 不变的条件下读取 A, V 表数值, 则

$$U_{do}=I_2R+U_2$$

求解两式, 可得电枢回路总电阻

$$R=(U_2-U_1)/(I_1-I_2)$$

如把电机电枢两端短接 (先调节并联电阻至最大, 再短接), 重复上述实验, 可得

$$R_L+R_n=(U'_2-U'_1)/(I'_1-I'_2)$$

则电机的电枢电阻为

$$R_a = R - (R_L + R_n)$$

同样，短接电抗器两端（先调节并联电阻，电枢短接），也可测得电抗器直流电阻 R_L

2. 电枢回路电感 L 的测定

电枢电路总电感包括电机的电枢电感 L_a ，平波电抗器电感 L_L 和整流变压器漏感 L_B ，由于 L_B 数值很小，可忽略，故电枢回路的等效总电感为

$$L = L_a + L_L$$

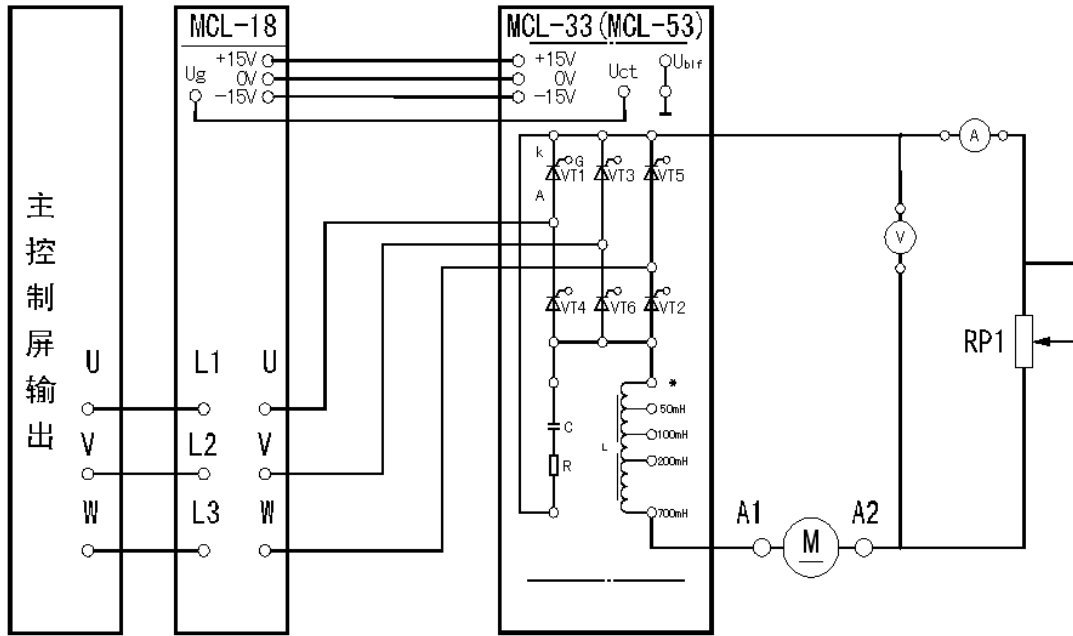
电感的数值可用交流伏安法测定。电动机应加额定励磁，并使电机堵转，实验线路如图 2-2 所示。

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。用电压表和电流表分别测出通入交流电压后电枢两端和电抗器上的电压值 U_a 和 U_L 及电流 I （可取 0.5A），从而可得到交流阻抗 Z_a 和 Z_L ，计算出电感值 L_a 和 L_L 。

实验时，交流电压的有效值应小于电机直流电压的额定值（ L_a 和 L_L 计算见教材 P277）。

$$Z_a = U_a / I$$

$$Z_L = U_L / I$$

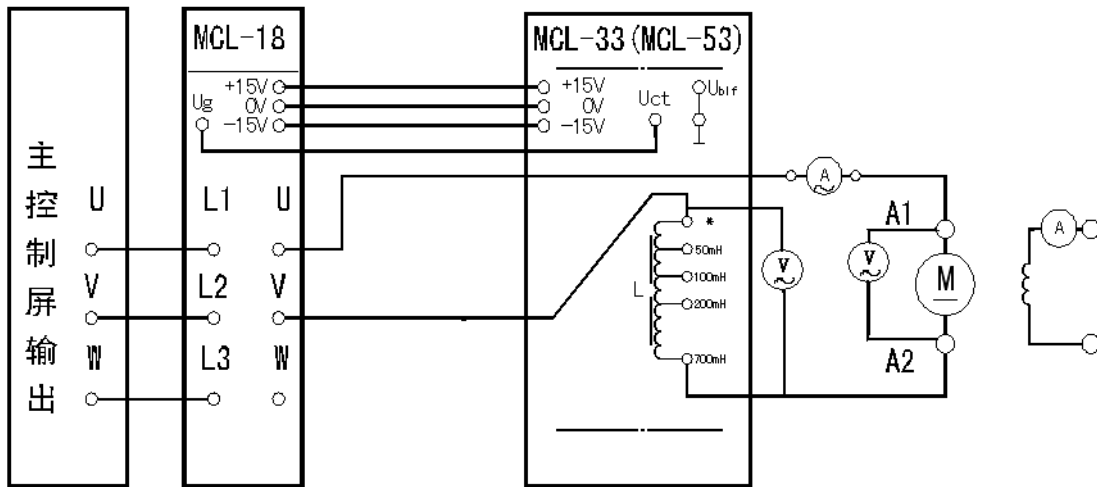


A: 直流电流表。

V: 直流电压表。

RP1: 电阻负载。可选择MEL-03中900欧并联。(Rmax=450欧, Imax=0.8安)

图2-1 电枢回路电阻R的测定



A: 交流电流表

V: 交流电压表

M: 直流电动机M03

L: 平波电抗器 (MCL-33), 可选最大值

图2-2 电枢回路电感L的测定

3. 直流电动机—发电机—测速发电机组的飞轮惯量GD²的测定。

电力拖动系统的运动方程式为

$$M - M_L = (GD^2 / 375) \times dn / dt$$

式中 M—电动机的电磁转矩，单位为 N.m;

M_L —负载转矩，空载时即为空载转矩 M_K ，单位为 N.m;

n — 电机转速，单位为 r/min;

电机空载自由停车时，运动方程式为

$$M_K = (-GD^2 / 375) \times dn / dt$$

故 $GD^2 = 375 M_K / |dn / dt|$

式中 GD^2 的单位为 Nm^2 。

M_K 可由空载功率（单位为 W）求出。

$$M_K = 9.55 P_K / n$$

$$P_K = U_a I_K - I_K^2 R$$

dn/dt 可由自由停车时所得曲线 $n=f(t)$ 求得，其实验线路如图 2-3 所示。

电动机 M 加额定励磁。

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，合上主电路电源开关，调节主控制屏输出电压 $U_{uv}=220v$ 。

调节 U_{ct} ，将电机空载起动至稳定转速后，测取电枢电压 U_a 和电流 I_K ，然后断开 U_{ct} ，用记忆示波器拍摄曲线，即可求取某一转速时的 M_K 和 dn/dt 。由于空载转矩不是常数，可以转速 n 为基准选择若干个（如 1500r/min，1000r/min），测出相应的 M_K 和 dn/dt ，以求取 GD^2 的平均值。

电机为 1500r/min。

U_d (v)	I_K (A)	dn/dt	P_K	M_K	GD^2

电机为 1000r/min。

U_d (v)	I_K (A)	dn/dt	P_K	M_K	GD^2

4. 主电路电磁时间常数的测定

采用电流波形法测定电枢回路电磁时间常数 T_d ，电枢回路突加给定电压时，电流 i_d 按指数规律上升

$$i_d = I_d(1 - e^{-t/T_d})$$

当 $t = T_d$ 时，有

$$i_d = I_d(1 - e^{-1}) = 0.632 I_d$$

实验线路如图 2-4 所示。

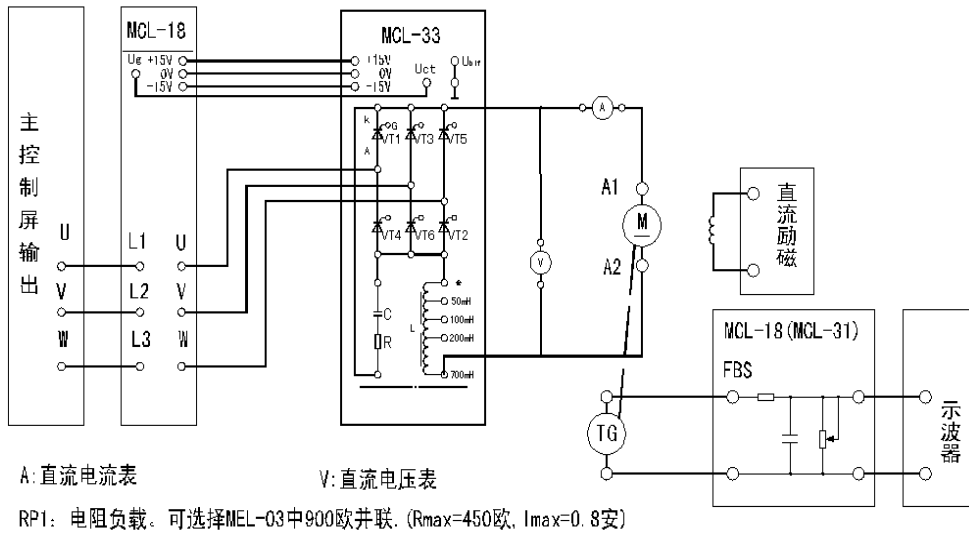


图2-3 转动惯量 GD^2 的测定和系统机电时间常数 T_m 的测定

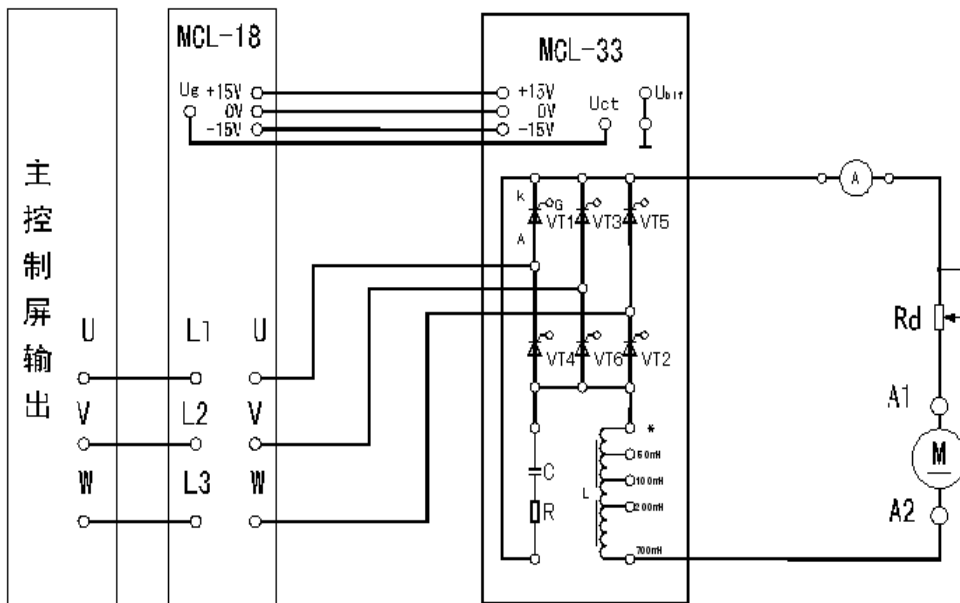


图2-4 主电路电磁时间常数的测定

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，合上主电路电源开关，调节主控制屏输出电压 $U_{uv}=220v$ 。

电机不加励磁。

调节 U_{ct} ，监视电流表的读数，使电机电枢电流为 $(50\sim 90)\%I_{ed}$ 。然后保持 U_{ct} 不变，突然合上主电路开关，用光线示波器拍摄 $i_d=f(t)$ 的波形，由波形图上测量出当电流上升至 63.2% 稳定值时的时间，即为电枢回路的电磁时间常数 T_d 。

5. 电动机电势常数 C_e 和转矩常数 C_M 的测定

参见 2-3 图，将电动机加额定励磁，使之空载运行，改变电枢电压 U_d ，测得相应的 n ，即可由下式算出 C_e

$$C_e = K_e \Phi = (U_{d2} - U_{d1}) / (n_2 - n_1)$$

Ce 的单位为 V/(r/min)

转矩常数(额定磁通时) C_M 的单位为 N.m/A, 可由 Ce 求出

$$C_M = 9.55 C_e$$

6. 系统机电时间常数 T_M 的测定

接线参见 2-3 图。系统的机电时间常数可由下式计算

$$T_M = (GD^2 \times R) / 375 C_e L_M$$

由于 $T_M \gg T_d$, 也可以近似地把系统看成是一阶惯性环节, 即

$$n = K / (1 + T_M s) \times U_d$$

当电枢突加给定电压时, 转速 n 将按指数规律上升, 当 n 到达 63.2% 稳态值时, 所经过的时间即为拖动系统的机电时间常数。

测试时电枢回路中附加电阻应全部切除。

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, 合上主电路电源开关, 调节主控制屏输出电压 $U_{uv} = 220V$ 。

电动机 M 加额定励磁。

调节 U_{ct} , 将电机空载起动至稳定转速 1000r/min。然后保持 U_{ct} 不变, 断开主电路开关, 待电机完全停止后, 突然合上主电路开关, 给电枢加电压, 用光线示波器拍摄过渡过程曲线, 即可由此确定机电时间常数。

7. 测速发电机特性 $U_{TG} = f(n)$ 的测定

实验线路如图 2-3 所示。

电动机加额定励磁, 逐渐增加触发电路的控制电压 U_{ct} , 分别读取对应的 U_{TG} , n 的数值若干组, 即可描绘出特性曲线 $U_{TG} = f(n)$ 。

n (r/min)					
U_{TG} (V)					

七. 实验报告

1. 作出实验所得各种曲线, 计算有关参数。
2. 由 $K_s = f(U_{ct})$ 特性, 分析晶闸管装置的非线性现象。

实验二 晶闸管直流调速系统主要单元调试

一. 实验目的

1. 熟悉直流调速系统主要单元部件的工作原理及调速系统对其提出的要求。
2. 掌握直流调速系统主要单元部件的调试步骤和方法。

二. 实验内容

1. 调节器的调试
2. 电平检测器的调试
3. 反号器的调试
4. 逻辑控制器的调试

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。
3. MCL—34 组件。
4. MEL-11 挂箱
5. 双踪示波器
6. 万用表

四. 实验方法

实验中所用的各控制单元的原理图见第一章有关内容。

1. 速度调节器 (ASR) 的调试

按图 2-5 接线, DZS(零速封锁器)的扭子开关扳向“解除”。

(1) 调整输出正、负限幅值

“5”、“6”端接 MEL-11 挂箱 ($7\mu F$), 使 ASR 调节器为 PI 调节器, 加入一定的输入电压 (由 MCL—18 或主控制屏的给定提供, 以下同), 调整正、负限幅 (分别为 +5V、-5V) 电位器 RP1、RP2, 使输出正负值等于 $\pm 5V$ 。

(2) 测定输入输出特性 (万用表测“3”端与地)

将反馈网络中的电容短接 (“5”、“6”端短接), 使 ASR 调节器为 P 调节器, 向调节器输入端逐渐加入正负电压, 测出相应的输出电压, 直至输出限幅值, 并画出曲线。

(3) 观察 PI 特性

拆除“5”、“6”端短接线，突加给定电压，用慢扫描示波器观察输出电压的变化规律，改变调节器的放大倍数及反馈电容，观察输出电压的变化。反馈电容由外接电容箱改变数值。

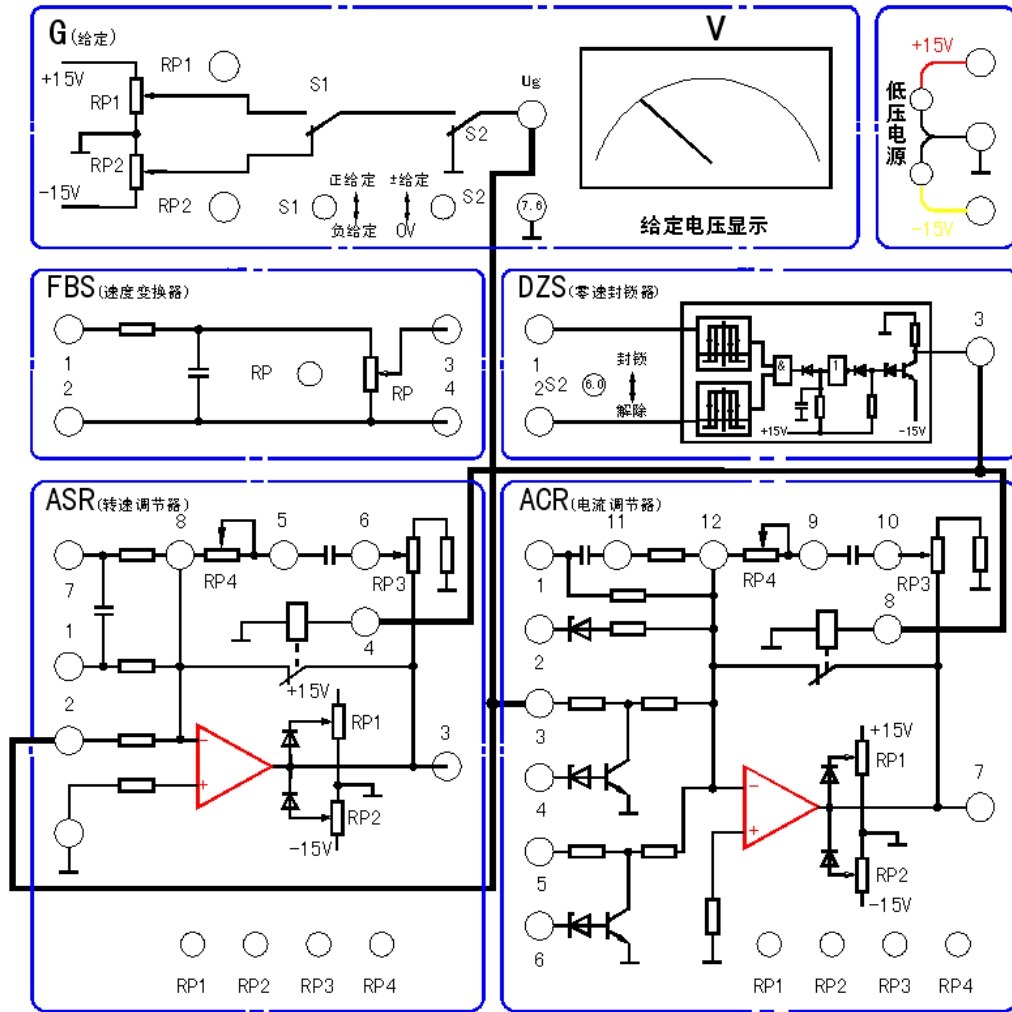


图2-5

2. 电流调节器 (ACR) 的调试

按图 2-5 接线。

(1) 调整输出正、负限幅值

“9”、“10”端接 MEL-11 挂箱，使调节器为 PI 调节器，加入一定的输入电压，调整正、负限幅电位器，使输出正负最大值大于 $\pm 6V$ 。

(2) 测定输入输出特性

将反馈网络中的电容短接 (“9”、“10”

端短接)，使调节器为 P 调节器，向调节器输入端逐渐加入正负电压，测出相应的输出电压，直至输出限幅值，并画出曲线。

(3) 观察 PI 特性

拆除“9”、“10”端短接线，突加给定电压，用慢扫描示波器观察输出电压的变化规律，改变调节器的放大倍数及反馈电容，观察输出电压的变化。反馈电容由外接电容箱改变数值。

3. 电平检测器的调试

(1) 测定转矩极性鉴别器 (DPT) 的环宽，要求环宽为 0.4~0.6 伏，记录高电平值，调节 RP 使环宽对称纵坐标。

具体方法：

(a) 调节给定 U_g ，使 DPT 的“1”脚得到约 0.3V 电压，调节电位器 RP，使“2”端输出从“1”变为“0”。

(b) 调节负给定，从 0V 起调，当 DPT 的“2”端从“0”变为“1”时，检测 DPZ 的“1”端应为 -0.3V 左右，否则应调整电位器，使“2”端电平变化时，“1”端电压大小基本相等。

(2) 测定零电流检测器 (DPZ) 的环宽，要求环宽也为 0.4~0.6 伏，调节 RP，使回环向纵坐标

右侧偏离 0.1~0.2 伏。

具体方法：

(a) 调节给定 U_g ，使 DPZ 的“1”端为 0.7V 左右，调整电位器 RP，使“2”端输出从“1”变为“0”。

(b) 减小给定，当“2”端电压从“0”变为“1”时，“1”端电压在 0.1~0.2V 范围内，否则应继续调整电位器 RP。

(3) 按测得数据，画出两个电平检测器的回环。

4. 反号器 (AR) 的调试

测定输入输出比例，输入端加 +5V 电压，调节 RP，使输出端为 -5V。

5. 逻辑控制器 (DLC) 的调试

测试逻辑功能，列出真值表，真值表应符合下表：

输入	UM	1	1	0	0	0	1
	UI	1	0	0	1	0	0
输出	Uz(Ub1f)	0	0	0	1	1	1
	UF(Ub1r)	1	1	1	0	0	0

调试时的阶跃信号可从给定器得到。

调试方法：

按图 2-6 接线

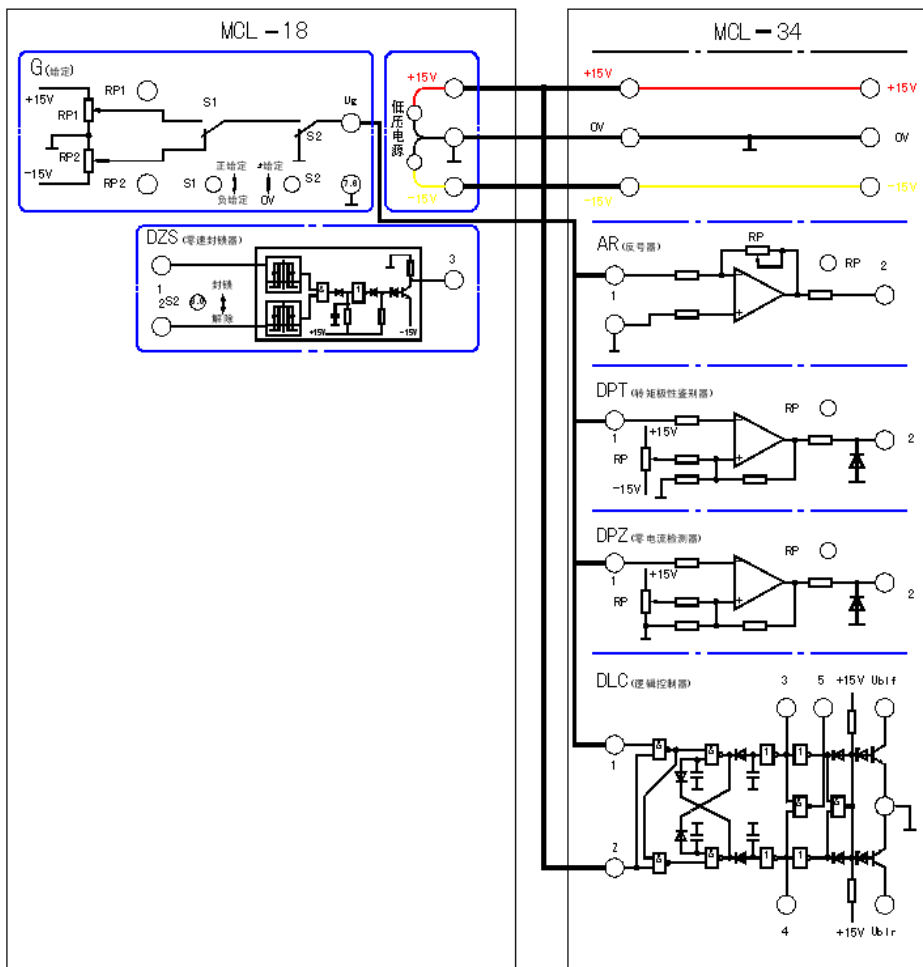


图2-6 逻辑控制器(DLC)的调试

(a) 给定电压顺时针到底， U_g 输出约为 12V。

(b) 此时上下拨动 MCL—18 中 G (给定) 部分 S2 开关, U_{b1f} 、 U_{b1r} 的输出应为高、低电平变化, 同时用示波器观察 DLC 的 “5”, 应出现脉冲, 用万用表测量, “3” 与 “ U_{b1f} ”, “4” 与 “ U_{b1r} ” 等电位。

(c) 把 +15V 与 DLC 的 “2” 连线断开, DLC 的 “2” 接地, 此时拨动开关 S2, U_{b1r} 、 U_{b1f} 输出无变化。

五. 实验报告

1. 画各控制单元的调试连线图。
2. 简述各控制单元的调试要点。

实验三 双闭环晶闸管不可逆直流调速系统

一. 实验目的

1. 了解双闭环不可逆直流调速系统的原理, 组成及各主要单元部件的原理。
2. 熟悉电力电子及教学实验台主控制屏的结构及调试方法。
3. 熟悉 MCL-18, MCL-33 的结构及调试方法
4. 掌握双闭环不可逆直流调速系统的调试步骤, 方法及参数的整定。

二. 实验内容

1. 各控制单元调试
2. 测定电流反馈系数。
3. 测定开环机械特性及闭环静特性。
4. 闭环控制特性的测定。
5. 观察, 记录系统动态波形。

三. 实验系统组成及工作原理

双闭环晶闸管不可逆直流调速系统由电流和转速两个调节器综合调节, 由于调速系统调节的主要量为转速, 故转速环作为主环放在外面, 电流环作为付环放在里面, 这样可抑制电网电压波动对转速的影响, 实验系统的组成如图 2-8 所示。

系统工作时, 先给电动机加励磁, 改变给定电压的大小即可方便地改变电机的转速。ASR, ACR 均有限幅环节, ASR 的输出作为 ACR 的给定, 利用 ASR 的输出限幅可达到限制起动电流的目的, ACR 的输出作为移相触发电路的控制电压, 利用 ACR 的输出限幅可达到限制 α_{\min} 和 β_{\min} 的目的。

当加入给定 U_g 后, ASR 即饱和输出, 使电动机以限定的最大起动电流加速起动, 直到电机转速达到给定转速 (即 $U_g=U_{fn}$), 并出现超调后, ASR 退出饱和, 最后稳定运行在略低于给定转速的数值上。

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。
3. MCL—33 组件。
4. MEL-11 挂箱
5. MEL—03 三相可调电阻 (或自配滑线变阻器)。
6. 电机导轨及测速发电机、直流发电机 M01 (或电机导轨及测功机、MEL—13 组件)。
7. 直流电动机 M03。
8. 双踪示波器。

五. 注意事项

1. 三相主电源连线时需注意，不可换错相序。
2. 电源开关闭合时，过流保护、过压保护的发光二极管可能会亮，只需按下对应的复位开关 SB1、SB2 即可正常工作。
3. 系统开环连接时，不允许突加给定信号 U_g 起动电机
4. 起动电机时，需把 MEL-13 的测功机加载旋钮逆时针旋到底，以免带负载起动。
5. 改变接线时，必须先按下主控制屏总电源开关的“断开”红色按钮，同时使系统的给定为零。
6. 进行闭环调试时，若电机转速达最高速且不可调，注意转速反馈的极性是否接错。
7. 双踪示波器的两个探头地线通过示波器外壳短接，故在使用时，必须使两探头的地线同电位（只用一根地线即可），以免造成短路事故。

六. 实验方法

4. 系统调试

将 U_{br} 接地， U_{br} 悬空，即使用一组桥六个晶闸管。

(1) 电流环调试

电动机不加励磁

(a) 系统开环，即控制电压 U_{ct} 由给定器 U_g 直接接入，DZS 开关 S_2 拨向“封锁”，主回路接入电阻 R_d 并调至最大（ R_d 由 MEL—03 的两只 900Ω 电阻并联）。逐渐增加给定电压，用示波器观察晶闸管整流桥两端电压波形。在一个周期内，电压波形应有 6 个对称波头平滑变化。

(b) 增加给定电压，减小主回路串接电阻 R_d ，直至 $I_d=1.1I_{ed}$ ，再调节 MCL-18 挂箱上的电流反馈电位器 RP_1 ，使电流反馈电压 U_{fi} 近似等于速度调节器 ASR 的输出限幅值（ASR 的输出限幅可调为 $\pm 5V$ ）。

(c) DZS 拨向“解除”，MCL—18（或实验台主控制屏）的 G（给定）输出电压 U_g 接至 ACR 的“3”端，ACR 的输出“7”端接至 U_{ct} ，即系统接入已接成 PI 调节的 ACR 组成电流单闭环系统。ACR 的“9”、“10”端接 MEL—11 电容器，可预置 $7\mu F$ 。逐渐增加给定电压 U_g ，使之等于 ACR 输出限幅值（+5V），观察主电路电流是否小于或等于 $0.9I_{ed}$ ，如 I_d 过大，则应调整电流反馈电位器，使 U_{fi} 增加，直至 $I_d < 0.9I_{ed}$ ；如 $I_d < I_{ed}$ ，则可将 R_d 减小直至切除，此时应增加有限，小于过电流保护整定值，这说明系统已具有限流保护功能。测定并计算电流反馈系数。

(2) 速度变换器的调试

电动机加额定励磁

(a) 系统开环，即给定电压 U_g 直接接至 U_{ct} ， U_g 作为输入给定，逐渐加正给定，当转速 $n=1500r/min$ 时，调节 FBS（速度变换器）中速度反馈电位器 RP ，使速度反馈电压为 +5V 左右，计算速度反馈系数。

(b) 速度反馈极性判断：系统中接入 ASR 构成转速单闭环系统，即给定电压 U_g 接至 ASR 的第 2 端，ASR 的第 3 端接至 U_{ct} 。调节 U_g （ U_g 为负电压），若稍加给定，电机转速即达最高速且调节 U_g 不可控，则表明单闭环系统速度反馈极性有误。但若接成转速—电流双闭环系统，由于给定极性改变，故速度反馈极性可不变。

4. 系统特性测试

将 ASR,ACR 均接成 PI 调节器接入系统，形成双闭环不可逆系统。

ASR 的调试：(a) 反馈电位器 RP_3 逆时针旋到底，使放大倍数最小；

(b) “5”、“6”端接入 MEL—11 电容器，预置 $5\sim 7\mu F$ ；

(c) 调节 RP_1 、 RP_2 使输出限幅为 $\pm 5V$ 。

(1) 机械特性 $n=f(I_d)$ 的测定

(a) 调节转速给定电压 U_g ，使电机空载转速至 1500 r/min，再调节测功机加载旋钮（或发电机负载电阻 R_g ），在空载至额定负载范围内分别记录 7~8 点，可测出系统静特性曲线 $n=f(I_d)$

n(r/min)						
I(A)						

(2) 闭环控制特性 $n=f(U_g)$ 的测定

调节 U_g ，记录 U_g 和 n ，即可测出闭环控制特性 $n=f(U_g)$ 。

n(r/min)						
U_g (V)						

8. 系统动态波形的观察

用二踪慢扫描示波器观察动态波形，用光线示波器记录动态波形。在不同的调节器参数下，观察，记录下列动态波形：

- (1) 突加给定启动时，电动机电枢电流波形和转速波形。
- (2) 突加额定负载时，电动机电枢电流波形和转速波形。
- (3) 突降负载时，电动机电枢电流波形和转速波形。

注：电动机电枢电流波形的观察可通过 ACR 的第“1”端
转速波形的观察可通过 ASR 的第“1”端

七. 实验报告

1. 根据实验数据，画出闭环控制特性曲线。
2. 根据实验数据，画出闭环机械特性，并计算静差率。
3. 根据实验数据，画出系统开环机械特性，计算静差率，并与闭环机械特性进行比较。
4. 分析由光线示波器记录下来的动态波形。

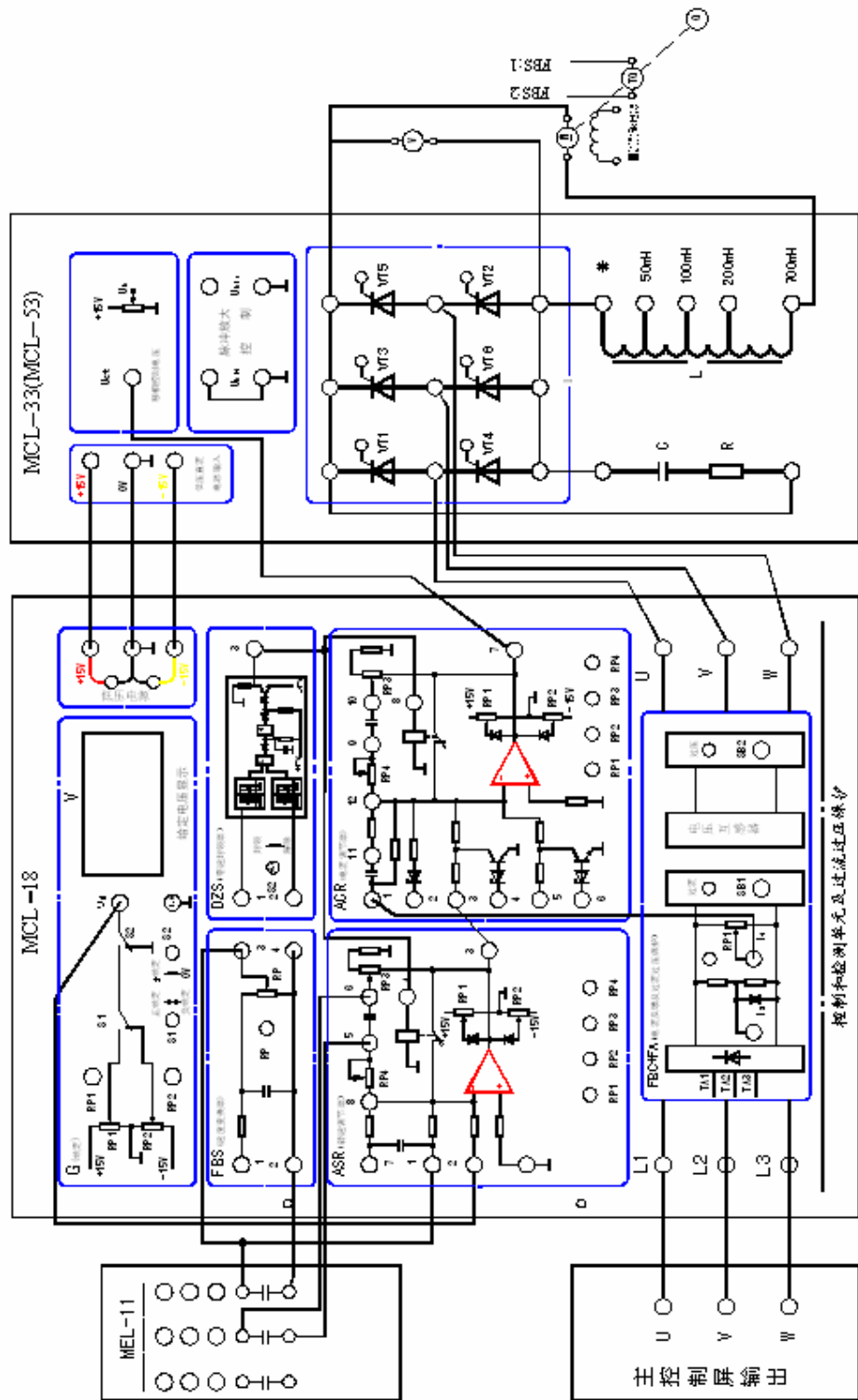


图2-8

实验四 逻辑无环流可逆直流调速系统

一. 实验目的

1. 了解并熟悉逻辑无环流可逆直流调速系统的原理和组成。
2. 掌握各控制单元的原理，作用及调试方法。
3. 掌握逻辑无环流可逆调速系统的调试步骤和方法。
4. 了解逻辑无环流可逆调速系统的静特性和动态特性。

二. 实验内容

1. 控制单元调试。
2. 系统调试。
3. 正反转机械特性 $n=f(I_d)$ 的测定。
4. 正反转闭环控制特性 $n=f(U_g)$ 的测定。
5. 系统的动态特性的观察。

三. 实验系统的组成及工作原理

逻辑无环流系统的主路由二组反并联的三相全控整流桥组成，由于没有环流，两组可控整流桥之间可省去限制环流的均衡电抗器，电枢回路仅串接一个平波电抗器。

控制系统主要由速度调节器 ASR，电流调节器 ACR，反号器 AR，转矩极性鉴别器 DPT，零电流检测器 DPZ，无环流逻辑控制器 DLC，触发器，电流变换器 FBC，速度变换器 FBS 等组成。其系统原理图如图 2-9 所示。

正向起动时，给定电压 U_g 为正电压，无环流逻辑控制器的输出端 U_{b1f} 为“0”态， U_{b1r} 为“1”态，即正桥触发脉冲开通，反桥触发脉冲封锁，主回路正组可控整流桥工作，电机正向运转。

减小给定时， $U_g < U_m$ ，使 U_{gi} 反向，整流装置进入本桥逆变状态，而 U_{b1f}, U_{b1r} 不变，当主回路电流减小并过零后， U_{b1f}, U_{b1r} 输出状态转换， U_{b1f} 为“1”态， U_{b1r} 为“0”态，即进入它桥制动状态，使电机降速至设定的转速后再切换成正向运行；当 $U_g=0$ 时，则电机停转。

反向运行时， U_{b1f} 为“1”态， U_{b1r} 为“0”态，主电路反组可控整流桥工作。

无环流逻辑控制器的输出取决于电机的运行状态，正向运转，正转制动本桥逆变及反转制动它桥逆变状态， U_{b1f} 为“0”态， U_{b1r} 为“1”态，保证了正桥工作，反桥封锁；反向运转，反转制动本桥逆变，正转制动它桥逆变阶段，则 U_{b1f} 为“1”态， U_{b1r} 为“0”态，正桥被封锁，反桥触发工作。由于逻辑控制器的作用，在逻辑无环流可逆系统中保证了任何情况下两整流桥不会同时触发，一组触发工作时，另一组被封锁，因此系统工作过程中既无直流环流也无脉冲环流。

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。

3. MCL—33 组件。
4. MEL-11 挂箱
5. MEL—03 三相可调电阻（或自配滑线变阻器）。
6. 电机导轨及测速发电机、直流发电机 M01（或电机导轨及测功机、MEL—13 组件）。
7. 直流电动机 M03。
8. 双踪示波器。
9. MCL—34 组件

五. 实验预习

1. 熟悉系统的接线图，分析逻辑无环流可逆直流调速系统的原理。
2. 复习逻辑无环流可逆直流调速系统从正转切换到反转过程中，整流电压 U_d ，电枢电流 i_d ，转速 n 的动态波形图。

六. 注意事项

1. 实验时，应保证逻辑控制器工作；逻辑正确后才能使系统正反向切换运行。
2. 为了防止意外，可在电枢回路串联一定的电阻，如工作正常，则可随 U_g 的增大逐渐切除电阻。

七. 实验方法

1. 按图 2-9 接线，未上主电源之前，检查晶闸管的脉冲是否正常。

- (1) 用示波器观察双脉冲观察孔，应有间隔均匀，幅度相同的双脉冲
- (2) 检查相序，用示波器观察“1”，“2”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。
- (3) 将控制一组桥触发脉冲通断的六个直键开关弹出，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。
- (4) 将 U_{br} 接地，可观察反桥晶闸管的触发脉冲。
- (5) 用万用表检查 U_{bf} ， U_{br} 的电压，一为高电平，一为低电平，不能同为低电平。

2. 控制单元调试

- (1) 按实验四的方法调试 FBS，ASR，ACR
- (2) 按实验二的方法调试 AR，DPT，DPZ，DLC

对电平检测器的输出应有下列要求

转矩极性鉴别器 DPT:

电机正转	输出 U_M 为“1”态
电机反转	输出 U_M 为“0”态

零电流检测器 DPZ:

主回路电流接近零	输出 U_i 为“1”态
主回路有电流	输出 U_i 为“0”态

- (3) 调节 ASR,ACR 的串联积分电容，使系统正常，稳定运行。

3. 机械特性 $n=f(I_d)$ 的测定

测出 $n=1500\text{r/min}$ 的正, 反转机械特性 $n=f(I_d)$, 方法与实验四相同。

$n=1500\text{r/min}$

n(r/min)						
I(A)						

4. 闭环控制特性的测定

按实验四的方法测出正, 反转时的闭环控制特性 $n=f(U_g)$ 。

n(r/min)						
$U_g(V)$						

5. 系统动态波形的观察

用二踪慢扫描示波器观察并记录:

(1) 给定值阶跃变化(正向起动→正向停车→反向切换到正向→正向切换到反向→反向停车)时的动态波形。

(2) 电机稳定运行于额定转速, U_g 不变, 突加, 突减负载($20\% I_{ed} \leftrightarrow 100\% I_{ed}$) 的动态波形:

(3) 改变 ASR, ACR 的参数, 观察动态波形如何变化。

注: 电动机电枢电流波形的观察可通过 ACR 的第“1”端

转速波形的观察可通过 ASR 的第“1”端

八. 实验报告

1. 根据实验结果, 画出正, 反转闭环控制特性曲线。
2. 根据实验结果, 画出正, 反转闭环机械特性, 并计算静差率。
3. 分析参数变化对系统动态过程的影响。
4. 分析电机从正转切换到反转过程中, 电机经历的工作状态, 系统能量转换状况。

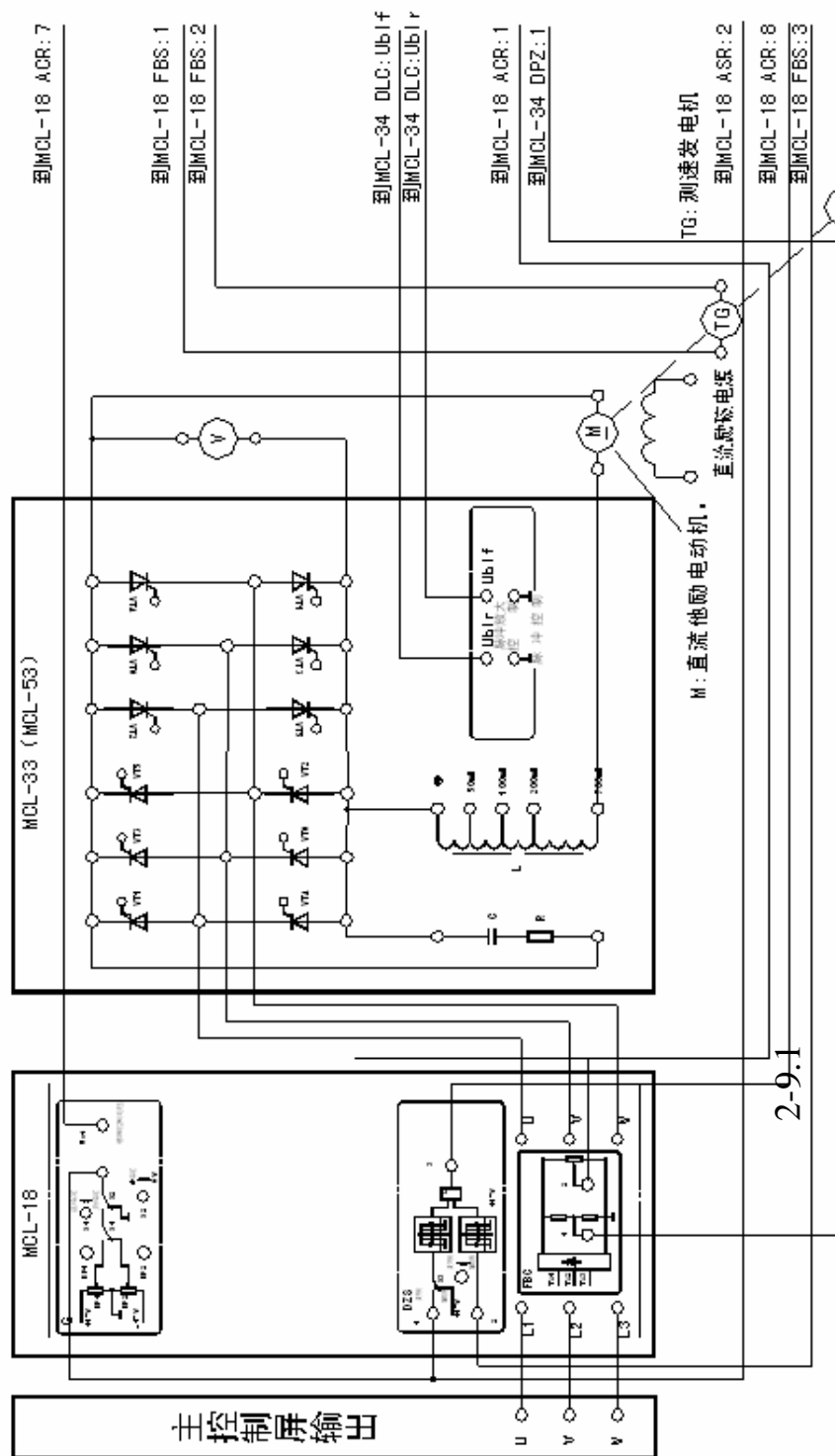


图 逻辑无环流可逆直流调速系统 (A)

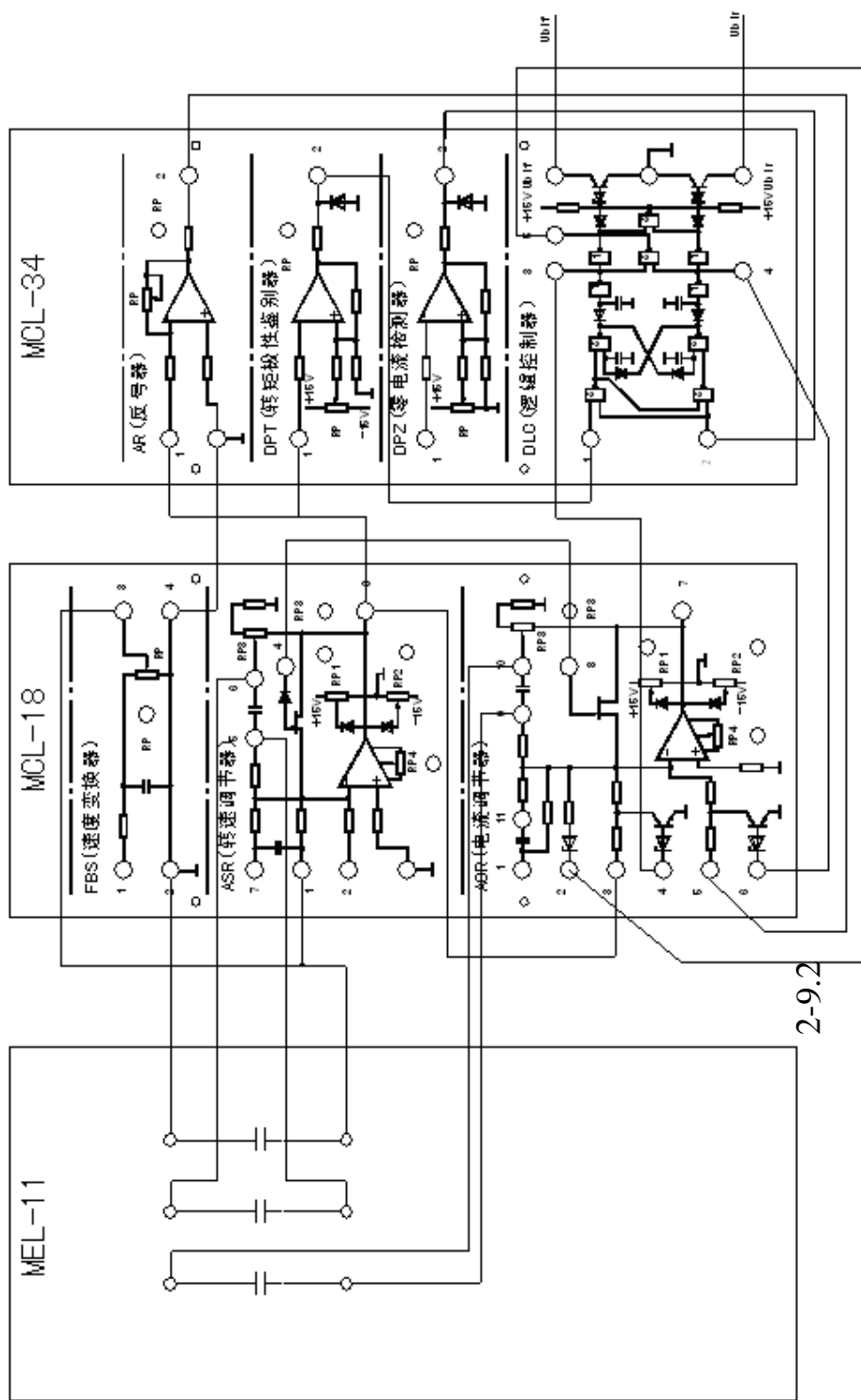


图 逻辑无环流可逆直流调速系统 (b)

实验五 双闭环可逆直流脉宽调速系统

一. 实验目的

1. 掌握双闭环可逆直流脉宽调速系统的组成、原理及各主要单元部件的工作原理。
2. 熟悉直流 PWM 专用集成电路 SG3525 的组成、功能与工作原理。
3. 熟悉 H 型 PWM 变换器的各种控制方式的原理与特点。
4. 掌握双闭环可逆直流脉宽调速系统的调试步骤、方法及参数的整定。

二. 实验内容

1. PWM 控制器 SG3525 性能测试。
2. 控制单元调试。
3. 系统开环调试。
4. 系统闭环调试。
5. 系统稳态、动态特性测试。
6. H 型 PWM 变换器不同控制方式时的性能测试。

三. 实验系统的组成和工作原理

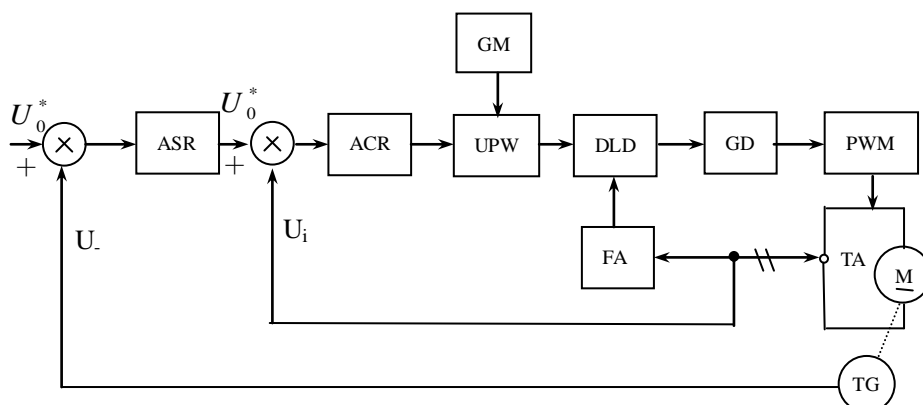


图 2—10 双闭环脉宽调速系统的原理图

在中小容量的直传动系统中，采用自关断器件的脉宽调速系统比相控系统具有更多的优越性，因而日益得到广泛应用。

双闭环脉宽调速系统的原理框图如图 2—10 所示。图中可逆 PWM 变换器主电路系采用 MOSFET 所构成的 H 型结构形式，UPW 为脉宽调制器，DLD 为逻辑延时环节，GD 为 MOS 管的栅极驱动电路，FA 为瞬时动作的过流保护。

脉宽调制器 UPW 采用美国硅通用公司 (Silicon General) 的第二代产品 SG3525，这是一种性能优良，功能全、通用性强的单片集成 PWM 控制器。由于它简单、可靠及使用方便灵活，大大简化了脉宽调制器的设计及调试，故获得广泛使用。

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。
3. MCL—10 组件或 MCL—10A 组件。
4. MEL-11 挂箱
5. MEL—03 三相可调电阻（或自配滑线变阻器）。
6. 电机导轨及测速发电机、直流发电机 M01（或电机导轨及测功机、MEL—13 组件）。
7. 直流电动机 M03。
8. 双踪示波器。

五. 注意事项

1. 直流电动机工作前，必须先加上直流激磁。
2. 接入 ASR 构成转速负反馈时，为了防止振荡，可预先把 ASR 的 RP3 电位器逆时针旋到底，使调节器放大倍数最小，同时，ASR 的“5”、“6”端接入可调电容（预置 $7\mu\text{F}$ ）。
3. 测取静特性时，须注意主电路电流不许超过电机的额定值（1A）。
4. 系统开环连接时，不允许突加给定信号 U_g 起动电机。
5. 起动电机时，需把 MEL-13 的测功机加载旋钮逆时针旋到底，以免带负载起动。
6. 改变接线时，必须先按下主控制屏总电源开关的“断开”红色按钮，同时使系统的给定为零。
7. 双踪示波器的两个探头地线通过示波器外壳短接，故在使用时，必须使两探头的地线同电位（只用一根地线即可），以免造成短路事故。
8. 实验时需要特别注意起动限流电路的继电器有否吸合，如该继电器未吸合，进行过流保护电路调试或进行加负载试验时，就会烧坏起动限流电阻。

六. 实验方法

采用 MCL—10 组件

1. SG3525 性能测试

分别连接“3”和“5”、“4”和“6”、“7”和“27”、“31”和“22”、“32”和“23”，然后打开面板右下角的电源开关。

(1) 用示波器观察“25”端的电压波形，记录波形的周期，幅度（需记录 S1 开关拨向“通”和“断”两种情况）

(2) S5 开关打向“OV”，用示波器观察“30”端电压波形，调节 RP2 电位器，使方波的占空比为 50%。

S5 开关打向“给定”分别调节 RP3、RP4，记录“30”端输出波形的最大占空比和最小占空比。（分别记录 S2 打向“通”和“断”两种情况）

2. 控制电路的测试

(1) 逻辑延时时间的测试

S5 开关打向“OV”，用示波器观察“33”和“34”端的输出波形。并记录延时时间。

$t_d =$

(2) 同一桥臂上下管子驱动信号死区时间测试

分别连接“7”和“8”、“10”和“11”，“12”和“13”、“14”和“15”、“16”和“17”、“18”和“19”，用双踪示波器分别测量 V_{VT1-GS} 和 V_{VT2-GS} 以及 V_{VT3-GS} 和 V_{VT4-GS} 的死区时间。

$t_{d.VT1.VT2} =$

$t_{d.VT3.VT4} =$

注意，测试完毕后，需拆掉“7”和“8”以及“10”和“11”的连线。

3. 开环系统调试

(1) 速度反馈系数的调试

断开主电源，并逆时针调节调压器旋钮到底，断开“9”、“10”所接的电阻，接入直流电动机 M03，电机加上励磁。

S4 开关扳向上，同时逆时针调节 RP3 电位器到底，合上主电源，调节交流电压输出至 220V 左右。调节 RP3 电位器使电机转速逐渐升高，并达到 1400r/min，调节 FBS 的反馈电位器 RP，使速度反馈电压为 2V。

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。

(2) 系统开环机械特性测定

参照速度反馈系数调试的方法，使电机转速达 1400r/min，改变测功机加载旋钮（或直流发电机负载电阻 R_d ），在空载至额定负载范围内测取 7—8 个点，记录相应的转速 n 和转矩 M （或直流发电机电流 i_d ）

n=1400r/min

n(r/min)							
i_d (A)							
M(N.m)							

调节 RP3，使 $n=1000/\text{min}$ 和 $n=500\text{r}/\text{min}$ ，作同样的记录，可得到电机在中速和低速时的机械特性。

n=1000r/min

n(r/min)							
i_d (A)							
M(N.m)							

n=500r/min

n(r/min)							
i_d (A)							
M(N.m)							

断开主电源，S4 开关拨向“负给定”，然后按照以上方法，测出系统的反向机械特性。

4. 闭环系统调试

将 ASR,ACR 均接成 PI 调节器接入系统，形成双闭环不可逆系统。

按图 2—11 接线

(1) 速度调节器的调试

- (a) 反馈电位器 RP3 逆时针旋到底，使放大倍数最小；
- (b) “5”、“6”端接入 MEL—11 电容器，预置 $5\sim 7\mu\text{F}$ ；
- (c) 调节 RP1、RP2 使输出限幅为 $\pm 2\text{V}$ 。

(2) 电流调节器的调试

- (a) 反馈电位器 RP3 逆时针旋到底，使放大倍数最小；
- (b) “5”、“6”端接入 MEL—11 电容器，预置 $5\sim 7\mu\text{F}$ ；
- (c) S5 开关打向“给定”，S4 开关扳向上，调节 MCL-10 的 RP3 电位器，使 ACR 输出正饱和，调整 ACR 的正限幅电位器 RP1，用示波器观察“30”的脉冲，不可移出范围。

S5 开关打向“给定”，S4 开关打向下至“负给定”，调节 MCL-10 的 RP4 电位器，使 ACR 输出负饱和，调整 ACR 的负限幅电位器 RP2，用示波器观察“30”的脉冲，不可移出范围。

5. 系统静特性测试

(1) 机械特性 $n=f(I_d)$ 的测定

S5 开关打向“给定”，S4 开关扳向上，调节 MCL-10 的 RP3 电位器，使电机空载转速至 1400 r/min，再调节测功机加载旋钮（或发电机负载电阻 R_g ），在空载至额定负载范围内分别记录 7~8 点，可测出系统正转时的静特性曲线 $n=f(I_d)$

n(r/min)						
I(A)						

S5 开关打向“给定”，S4 开关打向下至“负给定”，调节 MCL-10 的 RP4 电位器，使电机空载转速至 1400 r/min，再调节测功机加载旋钮（或发电机负载电阻 R_g ），在空载至额定负载范围内分别记录 7~8 点，可测出系统反转时的静特性曲线 $n=f(I_d)$

n(r/min)						
I(A)						

(2) 闭环控制特性 $n=f(U_g)$ 的测定

S5 开关打向“给定”，S4 开关扳向上，调节 MCL-10 的 RP3 电位器，记录 U_g 和 n ，即可测出闭环控制特性 $n=f(U_g)$ 。

n(r/min)						
U_g (V)						

6. 系统动态波形的观察

用二踪慢扫描示波器观察动态波形，用光线示波器记录动态波形。在不同的调节器参数下，观察，记录下列动态波形：

- (1) 突加给定起动时，电动机电枢电流波形和转速波形。
- (2) 突加额定负载时，电动机电枢电流波形和转速波形。
- (3) 突降负载时，电动机电枢电流波形和转速波形。

注：电动机电枢电流波形的观察可通过 MCL-03 的 ACR 的第“1”端
转速波形的观察可通过 MCL-03 的 ASR 的第“1”端。

以下的实验方法针对 MCL-10A 组件：

1. SG3525 性能测试

- (1) 用示波器观察“1”端的电压波形，记录波形的周期、幅度。
- (2) 用示波器观察“2”端的电压波形，调节 RP_2 电位器，使方波的占空比为 50%。
- (3) 用导线将“G”的“1”和“UPW”的“3”相连，分别调节正负给定，记录“2”端输出波形的最大占空比和最小占空比。

2. 控制电路的测试

(1) 逻辑延时时间的测试

在上述实验的基础上，分别将正、负给定均调到零，用示波器观察“DLD”的“1”和“2”端的输出波形，并记录延时时间 $t_d = \underline{\hspace{2cm}}$

(2) 同一桥臂上下管子驱动信号列区时间测试

分别将“隔离驱动”的 G 和主回路的 G 相连，用双踪示波器分别测量 $V_{VT1.GS}$ 和 $V_{VT2.GS}$ 以及 $V_{VT3.GS}$ 和 $V_{VT4.GS}$ 的列区时间：

$t_{dVT1.VT2} =$

$t_{dVT3.VT4} =$

3. 开环系统调试

按图 2—11a 接线

(1) 电流反馈系数的调试

- 将正、负给定均调到零，合上主控制屏电源开关，接通直流电机励磁电源。
- 调节正给定，电机开始起动直至达 1800r/min
- 给电动机拖加负载，即逐渐减小发电机负载电阻，直至电动机的电枢电流为 1A。
- 调节“FBA”的电流反馈电位器，用万用表测量“9”端电压达 2V 左右。

(2) 速度反馈系数的调试

在上述实验的基础上，再次调节电机转速的 1400r/min，调节 MCL-18（或 MCL-III 型主控制屏）的“FBS”电位器，使速度反馈电压为 5V 左右。

4. 其余方法可参考的实验步骤。

七. 实验报告

- 根据实验数据，列出 SG3525 的各项性能参数、逻辑延时时间、同一桥臂驱动信号死区时间、起动限流继电器吸合时的直流电压值等。
- 列出开环机械特性数据，画出对应的曲线，并计算出满足 $S=0.05$ 时的开环系统调速范围。
- 根据实验数据，计算出电流反馈系数 β 与速度反馈系数 α 。
- 列出闭环机械特性数据，画出对应的曲线，计算出满足 $S=0.05$ 时的闭环系统调速范围，并与开环系统调速范围相比较。
- 列出闭环控制特性 $n=f(u_g)$ 数据，并画出对应的曲线。
- 画出下列动态波形
 - 突加给定时的电动机电枢电流和转速波形，并在图上标出超调量等参数。
 - 突加与突减负载时的电动机电枢电流和转速波形。
- 试对 H 型变换器的优缺点以及由 SG3525 控制器构成的直流脉宽调速系统的优缺点及适用场合作出评述。
- 对实验中感兴趣现象的分析、讨论。
- 实验的收获、体会与改进意见。

八. 思考题

- 为了防止上、下桥臂的直通，有人把上、下桥臂驱动信号死区时间调得很大，这样做行不行，为什么？您认为死区时间长短由哪些参数决定？
- 与采用晶闸管的移相控制直流调速系统相对比，试归纳采用自关断器件的脉宽调速系统的优点。

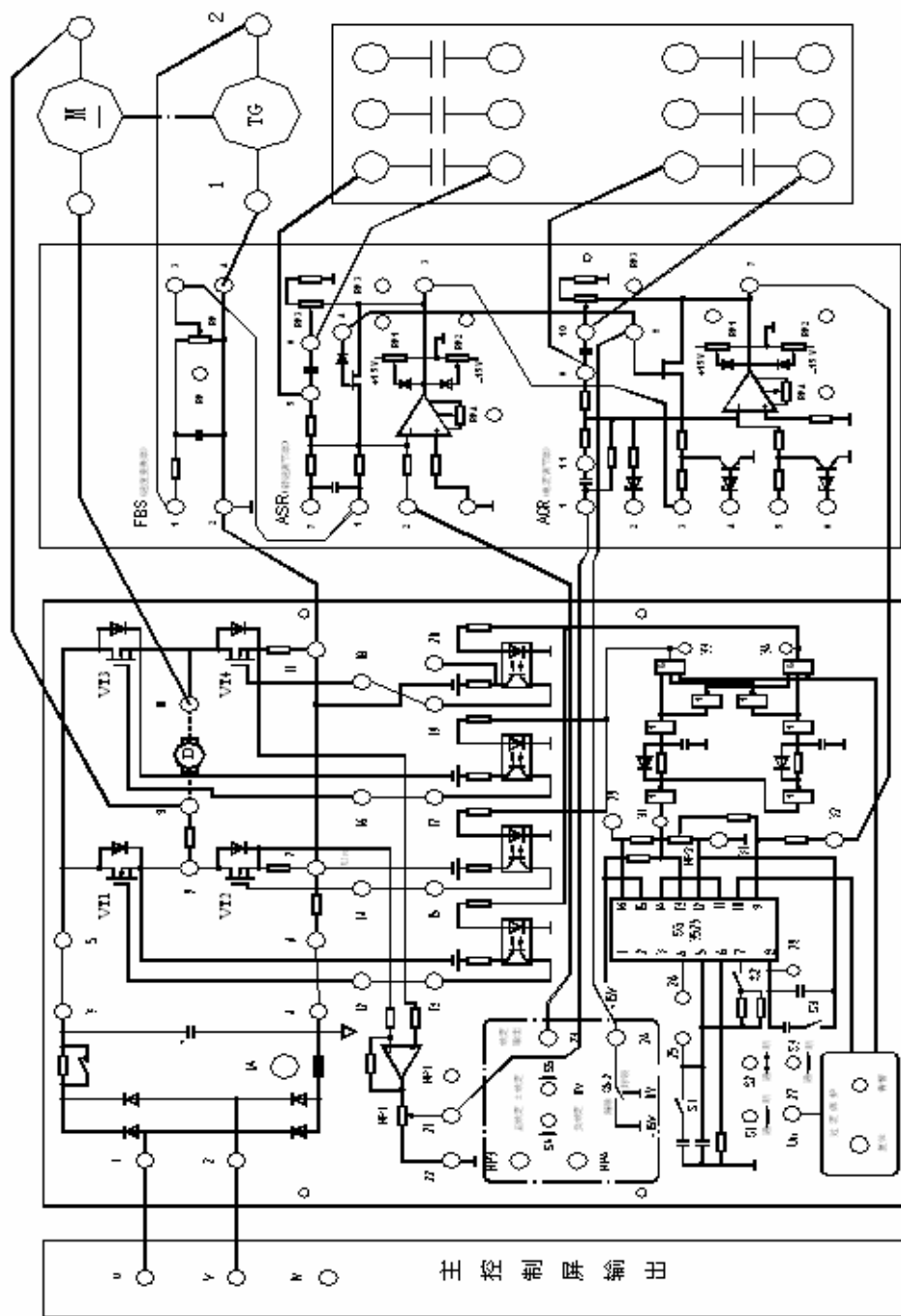


图 2-11 双闭环直流脉宽调速系统

第三部分 交流调速系统实验

实验一 双闭环三相异步电动机调压调速系统

一. 实验目的

1. 熟悉相位控制交流调压调速系统的组成与工作。
2. 了解并熟悉双闭环三相异步电动机调压调速系统的原理及组成。
3. 了解绕线式异步电动机转子串电阻时在调节定子电压调速时的机械特性。
4. 通过测定系统的静特性和动态特性进一步理解交流调压系统中电流环和转速环的作用。

二. 实验内容

1. 测定绕线式异步电动机转子串电阻时的人为机械特性。
2. 测定双闭环交流调压调速系统的静特性。
3. 测定双闭环交流调压调速系统的动态特性。

三. 实验系统组成及工作原理

双闭环三相异步电动机调压调速系统的主电路为三相晶闸管交流调压器及三相绕线式异步电动机（转子回路串电阻）。控制系统由电流调节器(ACR)，速度调节器(ASR)，电流变换器(FBC)，速度变换器(FBS)，触发器(GT)，一组桥脉冲放大器等组成。其系统原理图如图 3-1 所示。

整个调速系统采用了速度，电流两个反馈控制环。这里的速度环作用基本上与直流调速系统相同而电流环的作用则有所不同。在稳定运行情况下，电流环对电网振动仍有较大的抗扰作用，但在起动过程中电流环仅起限制最大电流的作用，不会出现最佳起动的恒流特性，也不可能是恒转矩起动。

异步电机调压调速结构简单，采用双闭环系统时静差率较小，且比较容易实现正，反转，反接和能耗制动。但在恒转矩负载下不能长时间低速运行，因低速运行时转差功率全部消耗在转子电阻中，使转子过热。

四. 实验设备和仪器

1. MCL 系列教学实验台主控制屏。
2. MCL—18 组件。
3. MCL—33 组件。
4. 电机导轨及测速发电机、直流发电机
5. MEL—09 三相可调电阻器
6. 绕线式异步电动机

7. MEL—11 组件
8. 直流电动机 M03
9. 双踪示波器。
10. 万用表

五. 注意事项

1. 接入 ASR 构成转速负反馈时, 为了防止振荡, 可预先把 ASR 的 RP3 电位器逆时针旋到底, 使调节器放大倍数最小, 同时, ASR 的“5”、“6”端接入可调电容 (预置 $7\mu F$)。
3. 测取静特性时, 须注意电流不许超过电机的额定值 (0.55A)。
4. 三相主电源连线时需注意, 不可换错相序。
5. 电源开关闭合时, 过流保护、过压保护的发光二极管可能会亮, 只需按下对应的复位开关 SB1、SB2 即可正常工作。
6. 系统开环连接时, 不允许突加给定信号 U_g 起动电机。
7. 起动电机时, 需把 MEL-13 的测功机加载旋钮逆时针旋到底, 以免带负载起动。
8. 改变接线时, 必须先按下主控制屏总电源开关的“断开”红色按钮, 同时使系统的给定为零。
9. 双踪示波器的两个探头地线通过示波器外壳短接, 故在使用时, 必须使两探头的地线同电位 (只用一根地线即可), 以免造成短路事故。
10. 低速实验时, 实验时间应尽量短, 以免电阻器过热引起串接电阻数值的变化。
11. 绕线式异步电动机: $P_N=100W$, $U_N=220V$, $I_N=0.55A$, $n_N=1350$, $M_N=0.68$, Y 接。

六. 实验方法

1. 移相触发电路的调试 (主电路未通电)

- (a) 用示波器观察 MCL—33 的双脉冲观察孔, 应有双窄脉冲, 且间隔均匀, 幅值相同;
- (b) 将面板上的 U_{br} 端接地, 调节偏移电压 U_b , 使 $U_{ct}=0$ 时, α 接近 150° 。将正组触发脉冲的六个键开关“接通”, 观察正桥晶闸管的触发脉冲是否正常 (应有幅值为 $1V\sim 2V$ 的双脉冲)。
- (c) 触发电路输出脉冲应在 $30^\circ\sim 90^\circ$ 范围内可调。可通过对偏移电压调节电位器及 ASR 输出电压的调整实现。例如: 使 ASR 输出为 $0V$, 调节偏移电压, 实现 $\alpha =90^\circ$; 再保持偏移电压不变, 调节 ASR 的限幅电位器 RP1, 使 $\alpha =30^\circ$ 。

2. 控制单元调试

按直流调速系统方法调试各单元

3. 求取调速系统在无转速负反馈时的开环工作机械特性。

- a. 断开 ASR (MCL—18) 的“3”至 U_{ct} (MCL—33) 的连接线, G (给定) 直接加至 U_{ct} , 且 U_g 调至零。

直流电机励磁电源开关闭合。交流电机转子回路接入每相为 10Ω 左右的三相电阻。

- b. 合上主控制屏的绿色按钮开关, 调节三相调压器的输出, 使 U_{uv} 、 U_{vw} 、 $U_{wu}=230V$ 。

- c. 调节给定电压 U_g , 使电机空载转速 $n_0=1300$ 转/分, 调节测功机加载旋钮 (或直流发电机负载电阻), 在空载至额定负载的范围内测取 7~8 点, 读取测功机输出转矩 M (或直流发电机输入电压 U_d , 输出电流 i_d) 以及被测电动机转速 n 。

n(r/min)						
----------	--	--	--	--	--	--

$I_G(A)$						
$U_G(V)$						
$M(N.m)$						

注：若采用直流发电机，转矩可按式计算

$$M = 9.55(I_G U_G + I_G^2 R_s + P_0) / n$$

式中：

M ——三相异步电动机电磁转矩；

I_G ——直流发电机电流；

U_G ——直流发电机电压；

R_s ——直流发电机电枢电阻；

P_0 ——机组空载损耗。不同转速下取不同数值： $n=1500r/min$, $P_0=13.5W$ ； $n=1000r/min$, $P_0=10W$ ； $n=500r/min$, $P_0=6W$ 。

d. 调节 U_g ，降低电机端电压，在 $1/3U_e$ 及 $2/3U_e$ 时重复上述实验，以取得一组人为机械特性。

4. 系统调试

(1) 调压器输出接三相电阻负载，观察输出电压波形是否正常。

(2) 将系统接成双闭环调压调速系统，转子回路仍串每相 10Ω 左右的电阻，渐加给定 U_g 至 $+5V$ ，调节 FBS 的反馈电位器，使电机空载转速 $n_0=1300$ 转/分，观察电机运行是否正常。

(3) 调节 $ASR.ACR$ 的外接电容及放大倍数调节电位器，用慢扫描示波器观察突加给定的动态波形，确定较佳的调节器参数。

5. 系统闭环特性的测定

调节 U_g ，使转速至 $n=1300r/min$ ，从轻载按一定间隔做到额定负载，测出闭环静特性 $n=f(M)$ 。

$n(r/min)$						
$I_G(A)$						
$U_G(V)$						
$M(N.m)$						

系统动态特性的观察

用慢扫描示波器观察并记录：

(1) 突加给定启动电机时转速 n ，电机定子电流 i 及 ASR 输出 U_{gi} 的动态波形。

(2) 电机稳定运行，突加，突减负载时的 n , U_{gi} , i 的动态波形。

七. 实验报告

1. 根据实验数据，画出开环时，电机人为机械特性。
2. 根据实验数据，画出闭环系统静特性，并与开环特性进行比较。
3. 根据记录下的动态波形分析系统的动态过程。

第四部分 仿真实验分析

一 几种典型的电路仿真软件包介绍

目前,运动控制系统仿真实验工具较多是采用电子电路的仿真软件,其中常见的软件有 PSpice、Saber、PSIM、MATLAB/Simulink、等,它们都提供了十分友好的用户操作界面。

1.1. PSpice

PSpice 是较早出现的 EDA(Electronic Design Automatic,电路设计自动化)软件之一,也是当今世界上著名的电路仿真标准工具之一,1984 年 1 月由美国 Microsim 公司首次推出。它是由 Spice 发展而来的面向 PC 机的通用电路模拟分析软件。Spice(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)是由美国加州大学伯克利分校开发的电路仿真程序,它在众多的计算机辅助设计工具软件中,是精度最高、最受欢迎的软件工具。随后,版本不断更新,功能不断完善。基于 DOS 操作系统的 PSpice5.0 以下版本自 80 年代以来在我国得到广泛应用。目前广泛使用的 PSpice5.1 以后版本是 Microsim 公司于 1996 年开发的基于 Windows 环境的仿真程序,并且从 6.0 版本开始引入图形界面。1998 年著名的 EDA 商业软件开发商 OrCAD 公司与 Microsim 公司正式合并,自此 Microsim 公司的 PSpice 产品正式并入 OrCAD 公司的商业 EDA 系统中,成为 OrCAD/PSpice。但 PSpice 仍然单独销售和使用,推出的最新版本为 PSpice 9.2。

PSpice 软件具有强大的电路图绘制功能、电路模拟仿真功能、图形后处理功能和元器件符号制作功能,以图形方式输入,自动进行电路检查,生成网表,模拟和计算电路。它的用途非常广泛,不仅可以用于电路分析和优化设计,还可用于电子线路、电路和信号与系统等课程的计算机辅助教学。与印制版设计软件配合使用,还可实现电子设计自动化。被公认是通用电路模拟程序中最优秀的软件,具有广阔的应用前景。这些特点使得 PSpice 受到广大电子设计工作者、科研人员和高校师生的热烈欢迎,国内许多高校已将其列入电子类本科生和硕士生的辅修课程。

PSpice 软件几乎完全取代了电路和电子电路实验中的元件、面包板、信号源、示波器和万用表。有了此软件就相当于有了电路和电子学实验室。

1.2. Saber

Saber 是美国 Analogy 公司开发的系统仿真软件,可用于电子、电力电子、机电一体化、机械、水力、控制等领域的系统设计和仿真,其工作环境为 UNIX 的工作站。

1.2.1 Saber 仿真软件的组成部分

(1)Designstar

Designstar 是设计系统的图形化输入软件包,用它可以直观、方便地设计系统,产生系统网络表。用户也可以用它设计自己开发的部件模型的图形符号。

(2)SaberDesigner

SaberDesigner 是一个集成分析环境,其组成部分为: Saber 仿真器,或称 Saber 模拟和混合信号仿真引擎,它是 SaberDesigner 集成环境的核心; SaberGuide 菜单或按钮驱动的人机界面,用于指导仿真进程; SaberScope,波形显示、分析器,用于显示、分析仿真结果的波形。

(3)SaberBook

SaberBook 是文档浏览软件包。

1.2.2 Saber 的特点

Saber 仿真软件包具有以下特点:

(1)混合系统仿真

Saber 能够对由电子电力电子、机电一体化、机械、光电、光学、控制等不同类型系统构成的混

合系统进行仿真。这也是 Saber 的最大特点。

(2)适合于建立混合仿真模型的硬件描述语言——MAST

MAST 语言是 Analogly 公司开发的对物理部件建立仿真模型的硬件描述语言。用 MAST 语言可以对电子(数字或模型)、机械、控制等不同类型的部件建立仿真模型,实现混合仿真。

(3)开放的部件库

Saber 的部件库是开放式的,用户可以借助于 MAST 语言建立自己的部件模型,并用 Designstar 为其设计图形符号,以便能用图形输入方式设计系统。用户也可以用已有的部件组合出一个符合自己要求的子系统,并为此子系统建立一个图形符号,作为部件来用。

(4)模块化、分级式系统设计

Saber 允许系统按功能模块分级设计,即顶层系统可以包含若干个按功能划分的子系统,各子系统又可以包含下一层的子系统,以此类推。这种结构为大系统设计的分工合作带来了方便。

1.2.3 Saber 的分析功能

Saber 的分析功能是比较强的,主要有:DCanalysis(直流分析),用于计算设计的工作点;Transient(瞬态分析),分析确定系统的时域响应;AC(频响分析)分析系统随频率变化的响应特性;Fourier 和 FFT(傅里叶和快速傅里叶变换分析),将时域波形变换成频谱;iFFT(反快速傅里叶变换分析),将频域波形变换成时域波形。

1.3. PSIM

PSIM 是用于电力电子和电机控制的专业仿真软件,能够提供友好用户界面,具有快速仿真和多功能波形处理等优点,并包含有丰富的控制元件库,为电机驱动系统设计与控制回路分析提供了强大的仿真开发环境。利用 PSIM 进行电机控制系统建模与分析的研究已受到广泛关注,如:在 PSIM/SIMCAD 环境下已实现非线性开关磁阻电机(SRM)控制系统的仿真建模,通过编写链接库模块,建立了 SRM 仿真模型。

1.4. MATLAB/Simulink

MATLAB 是英文 MATrix LABoratory(短阵实验室)的缩写。它的第 1 版(DoS 版本 1.0)发行于 1984 年,经过 10 余年的不断改进,现今已推出它的 WindoM 98/NT 版本(7.0 版)。新的版本集中了日常数学处理中的各种功能,包括高效的数值计算、矩阵运算、信号处理和图形生成等功能。在 MATLAB 环境下,用户可以集成地进行程序设计、数值计算、图形绘制、输入输出、文件管理等各项操作。MATLAB 提供了一个人机交互的数学系统环境,该系统的基本数据结构是矩阵,在生成矩阵对象时,不要求作明确的维数说明。与利用 c 语言或 FoRTRAN 语言作数值计算的程序设计相比,利用 MATLAB 可以节省大量的编程时间。在美国的一些大学里, MATLAB 正在成为对数值线性代数以及其他一些高等应用数学课程进行辅助教学的有益工具。在工程技术界, MATLAB 也被用来解决一些实际课题和数学模型问题。典型的应用包括数值计算、算法预设计与验证,以及一些特殊的短阵计算应用,如自动控制理论、统计、数字信号处理(时间序列分拆)等。

MATLAB 作为控制领域最流行的 CAD 软件,自从 1980 年被推出以来一直受到工程技术人员的重视和广泛应用。该软件除了具有传统的交互式编程能力外,还具有强有力的矩阵计算、数据处理和图形处理功能。特别是由 MATLAB 推出的大量的控制系统工具箱和图形仿真环境——Simulink,通过提供图形化的用户界面(GUI),由信号源、线性和非线性器件、连接线和各种工具箱组成的模型库以及由用户自己定制和创建的模型库,解决了建模和分析这个关键的问题,进一步方便了用户的使用,使 MATLAB 得到广泛的应用。

1.4.1 POW ERSYS 工具箱及其在交流传动系统仿真中的应用

POW ERSYS (Power System Blockset) 是从 MA TLAB5.2 开始新增加的一个电力系统仿真工具

箱。它包含各种基于 SIMULINK 的电力器件模型，比如电压源，电流源，变压器，线性和非线性网络模块，电力电子器件，各种交流电机模型，连接件和电压、电流测量等等。用户可以方便地用它建立一个电力系统模型，POWER SYSTEM 负责各种线性和非线性电路的稳态和动态分析以及与 SIMULINK 的交互。用户还可运用 MATLAB 的其它工具箱完成控制算法以及与电力系统有关的其它部分，组成完整的闭环控制系统。

1.5 几种典型的电路仿真软件包的特点比较

适用于电力电子系统的通用仿真软件有 PSPICE、SABER、MATLAB 等。这些软件都提供了最基本的通用电路仿真功能，并因其应用领域的不同而各有特色。但它们大多采用面向电路或面向器件的仿真算法。

在目前流行的电力电子仿真软件中，PSPICE是应用较多的一种。这与PSPICE的仿真能够与电路原理图的设计相结合得较密切有关PSPICE的应用范围很广，电力电子电路仅仅是其应用领域之一。PSPICE的电路元件模型反映实际型号元件的特性，通过对电路方程运算求解，能够仿真电路的细节，特别适合于对开关电路中开关暂态过程的描述。它的仿真波形与实验电路的测试结果相近，对电路设计有重要指导意义。PSPICE的仿真数据处理量比较庞大，仿真的处理速度较慢，输出数据结构的格式兼容性亦不甚理想。PSPICE的另一问题是仿真的收敛性往往成为问题，复杂电路的仿真有时数据的准确性较低。

与PSPICE相比，SABER是功能更为强大的仿真软件，它可以仿真电力电子元件、电路和系统，不仅具有PSPICE的功能，而且具有更丰富的元件库和更精致的仿真描述能力，还能结合数学控制方程模块工作。SABER还可以仿真电力传动、机械、热力、流体等其它运动过程。SABER的仿真真实性很好，从仿真的电路到实际的电路实现，其间参数基本不用修改。与PSPICE相仿，SABER的数据处理量亦相当庞大，仿真的处理速度慢。SABER应用的主要困难是操作较为复杂、软件价格高昂，比较适合于大企业应用，而中小企业一般是通过委托研究、开发来利用该软件。

针对目前电力电子仿真软件的各自特点和电力电子研发的要求，PSIM作为一种新的仿真软件开始得到应用。PSIM的特点是采用类似于上述MATLAB的基于一般电路元件的模型以及数学模块来进行仿真的思路，并结合PSPICE的简便电路作图方法。PSIM的图形界面十分友好，比上述软件均容易掌握。由于PSIM是专门针对电力电子电源和电力电子传动而设计的，设计仿真电路比MATLAB的POWER SYSTEM方便，其运行效率十分高。PSIM的输出数据格式兼容性亦十分好，能够方便地转换到EXCEL和MATLAB所识别的格式与MATLAB相仿，因其模型元件为理想元件，其仿真结果的参考意义体现在电路的总体与系统上。

由于开关元件处理上的简化，PSIM在提高仿真速度、简化电路图设计过程的同时，也失去了描述开关过渡过程的能力。因此，对于开关过程的电流、电压尖刺等暂态过程，PSIM一般不能详细描述。虽然通过附加杂散小参数，也可以使PSIM能够反映电流、电压尖刺等开关暂态过程，但这会使电路设计复杂化。在模拟实际电路的波形方面，PSIM不如SABER和PSPICE准确。

目前，大型科学计算与仿真软件MATLAB已经可以配备电力系统工具包(POWER SYSTEM)。这使得MATLAB可以用于电力电子仿真。POWER SYSTEM的仿真是基于MATLAB的SIMULINK图形环境，因而使用起来与PSPICE一样方便。MATLAB的强大数学运算功能，使得POWER SYSTEM的控制功能非常卓越，尤其是利用其他相关的工具包，电路可以实现极为细致控制而不需花费很大的精力。使用MATLAB的另外好处是：其数据处理十分有效、精细，运行速度较快；其数据的格式兼容性十分好，便于数据的后处理与分析。尤其是控制特性的研究分析。问题在于目前的POWER SYSTEM是基于一般电路元件的模型以及数学模块（例如传递函数）来进行仿真的，与实际元件的参数有差别，仿真的结果与实际电路有一定距离，其结果的参考意义主要体现在电路的总体与系统上，基本忽略了对实际开关的暂态过程描述。

二 MATLAB/Simulink 在运动控制系统中的仿真应用

2.1.直流调速系统仿真分析

直流调速系统中，最常见的就是闭环调速系统，主要有速度反馈单闭环、速度电流双闭环、带微分负反馈的双闭环调速系统等。

(一). 实验目的

1. 加深对所学的直流调速系统理论的理解。
2. 学会使用 MATLAB/Simulink 进行晶闸管直流调速系统动、静态分析。

(二). 实验内容

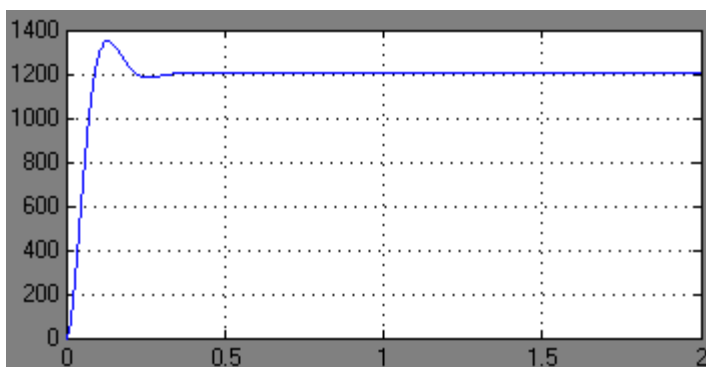
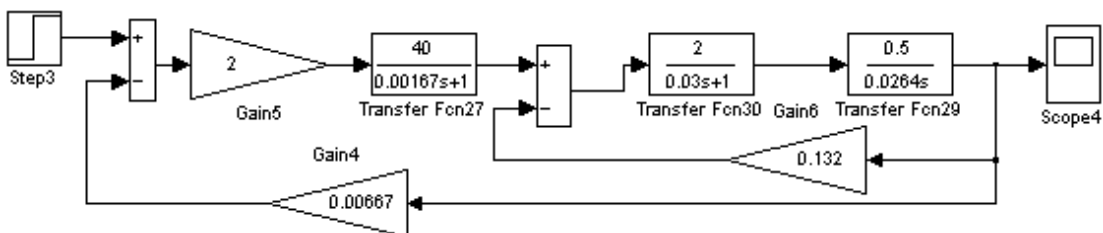
1. 速度反馈单闭直流调速系统仿真分析。
2. 无静差直流调速系统动态分析。
3. 速度电流双闭环直流调速系统动、静态仿真分析。

(三). 实验系统组成和工作原理

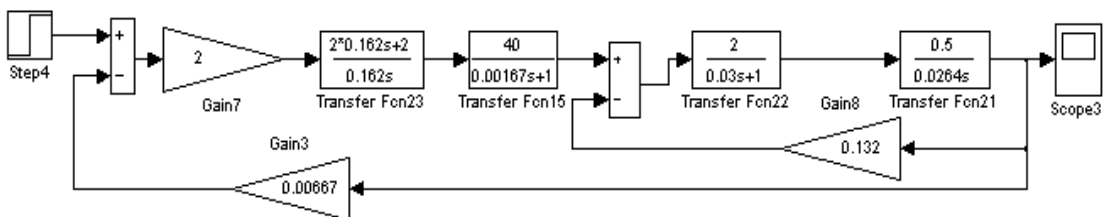
原理参考教材，组成分别见实验内容中各组成部分。

①速度反馈单闭环调速系统 参数为 $T_1=0.003s$ 、 $T_m=0.2s$ 、 $K_s=40$ 、 $R_d=0.5\Omega$ 、 $C_e=0.132V/r/min$ 、 $\alpha = 0.00667$ 、 $T_s=0.00167s$ 、转速给定信号 $U_{mm}^*=10V$ ，电机额定转速为 $1500r/min$ 。

速度调节器采用比例调节器 $K_p=2$ ，则是有静差系统。Matlab 仿真结构图及仿真结果如下（阶跃给定定为 10）：



速度调节器采用 PI 调节器速度反馈单闭环调速系统仿真结构图及仿真结果如下：（设 PI 调节器形式： $G_c(s)=2(0.162s+1)/0.162s$ ）



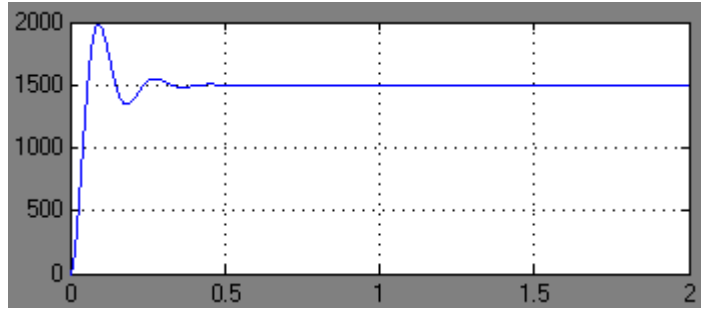


图 4-2 PI 调节器速度反馈单闭环调速系统

②双闭环调速系统 电机额定转速为 1500r/min，ACR、ASR 均为 PI 调节器。

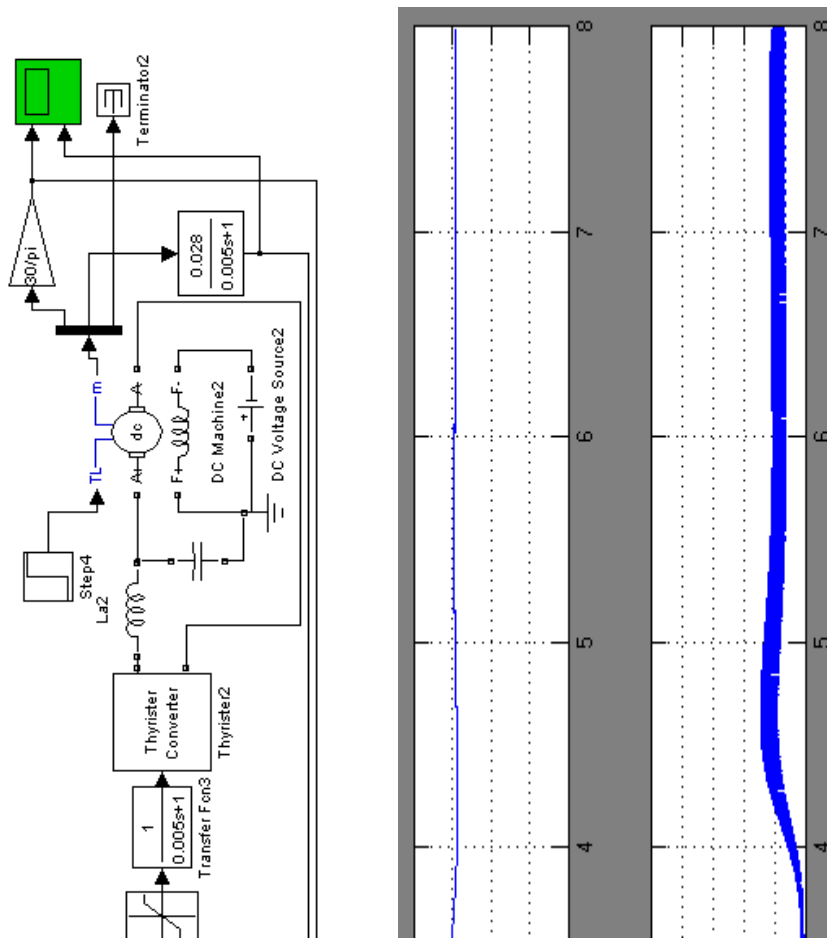


图 4-3 双闭环调速系统

2.2.交流调速系统仿真分析

目前已经提出并得到应用的 PWM 控制算法不下 10 种,最常用的 PWM 技术为 SPWM。与 SPWM 相比,德国学者 H.W.VanderBroek 等出的基于电压空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 技术,不仅使得机转矩脉动降低、电流波形畸变减小,而且 SPWM 技术相比直流电压利用率有很大提高,并易于数字化实现。电压空间矢量脉宽调制技术交流传动领域已得到了广泛的应用。还可以证明压空间矢量脉宽调制技术可以等效为注入一定零分量的 SPWM。

(一). 实验目的

1. 加深对所学的交流调速系统理论的理解。
2. 学会使用 MATLAB/Simulink 进行常见的变频调速算法分析。

(二). 实验内容

1. 掌握变频调速系统原理和组成部分。
2. SPWM 算法或 SVPWM 算法仿真分析。

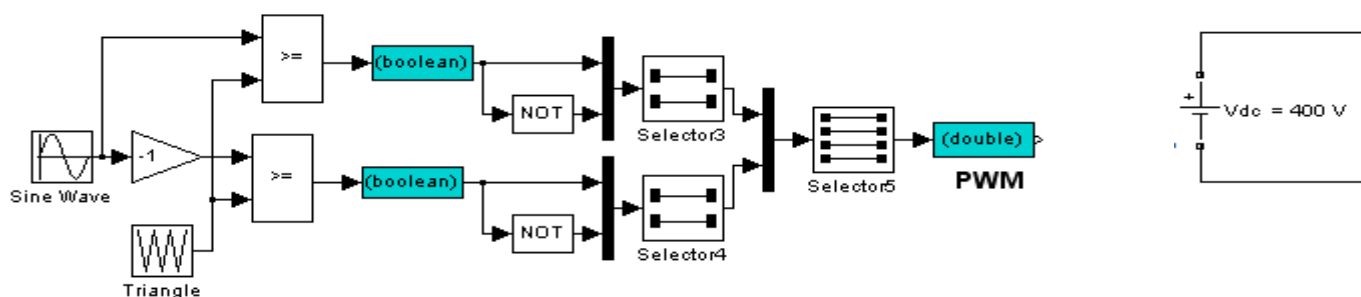
(三). 实验系统组成和工作原理

原理参考教材,组成分别见实验内容中各组成部分。

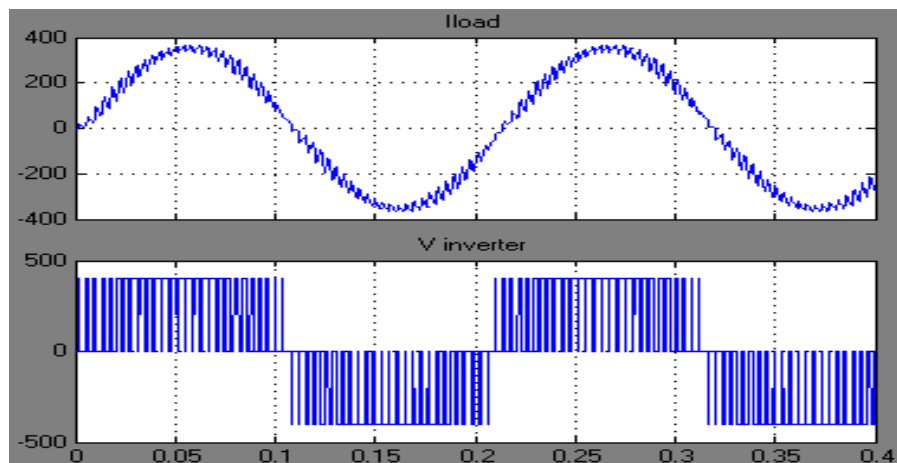
2.2.1 SPWM 算法

SPWM 算法的各功率器件基极驱动信号通常采用载波信号 (如三角波) 与参考信号 (如正弦波) 相比较的方法产生。以单相双极型调制、自然采样法为例,在 SIMULINK 中, PWM 发生器如下:

a. PWM 发生器



b. 主电路



c. 输出波形

图 4-4 SPWM 算法仿真实验系统

模块名称	函数名称	主要参数设置
Sine Wave	Sine Wave	频率: 60Hz, 幅值: 0.9
Triangle	Repeating Sequence	时间值: [0 1/2/400*pi 1/400*pi], 输出值: [1 -1 1]
比较器	Relational Operator	>=
boolean	Data Type Conversion	数据类型: boolean
double	Data Type Conversion	数据类型: double
NOT	Logical Operator	operator: NOT
Selector	Selector	输入类型: Vector; (两入两出) Elements: [1 2], Input Port width: 2; (四入四出) Elements: [1 2 3 4], Input Port width: 4
Universal Bridge 2 arms	Universal Bridge	逆变臂数目: 2, 功率器件: IGBT/Diodes
负载	Series RLC Branch	电阻: 1, 电感: 5e-03, 电容: inf (无穷大)

2.2.2 SVPWM 算法

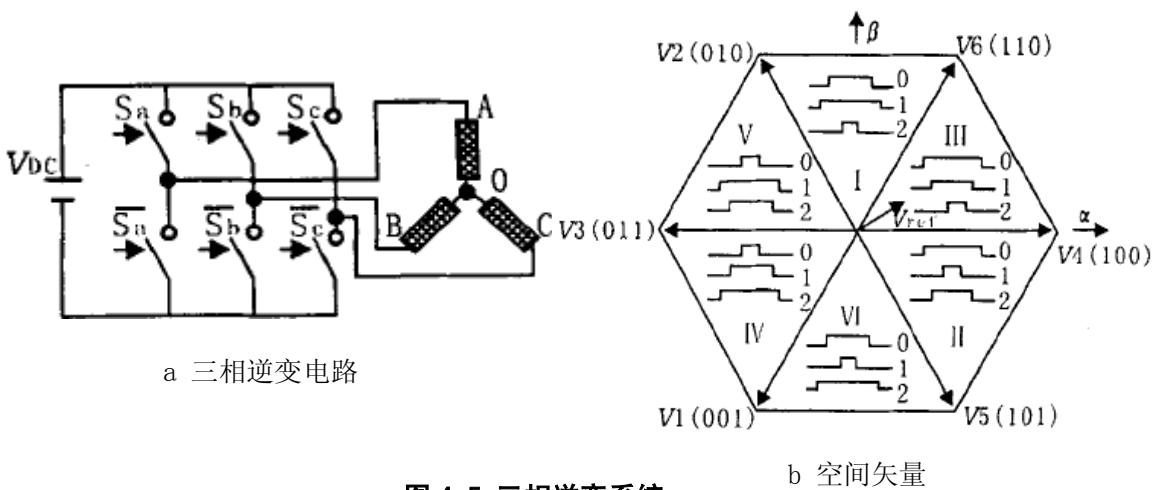


图 4-5 三相逆变系统

在图 4-5. a 所示电路中，三相逆变器实际运行中只有 6 个有效电压空间矢量 $V1 \sim V6$ 和 2 个零

电压空间矢量 $V0$ 、 $V7$ (如图 4-5. b 所示)。因此，只能用 $V0 \sim V7$ 这 8 个电压矢量的线性组合去等效旋转矢量 V_{ref} ，所产生的实际的电机气隙磁通轨迹逼近圆形。

SVPWM 的实现步骤主要分以下几步：

首先判断参考矢量 V_{ref} 所处扇区，SVPWM 算法首先要知道 V_{ref} 所处的扇区，判断 V_{ref} 所处的扇区的模型框图如图 4-6 所示。

再计算不同扇区的 2 个相邻有效矢量的作用时间，用 X 、 Y 、 Z 表示，以及根据扇区分配矢量的作用时间 $T1$ 、 $T2$ ，最后根据扇区确定电压空间矢量切换点 $T_{cmx}(x=1, 2, 3)$ 。

如图 4-5. b 所示，设 A、B 轴的电压分量分别为 $V\alpha$ 和 $V\beta$ ，其合成矢量为 V_{ref} (即 $V_{ref}=V\alpha + jV\beta$)。如果 V_{ref} 处在 III 扇区 (即 $0 \leq \theta < \pi/3$) 内，根据平均值等效原理可得：

$$V4 * T4 + V6 * T6 = V_{ref} * T \quad (1)$$

$$T = T4 + T6 + T0 \quad (2)$$

式中 T —PWM 周期 $T4$ — $V4$ 作用时间 $T6$ — $V6$ 作用时间 $T0$ — $V0$ 或 $V7$ 作用时间

$V4$ 和 $V6$ 的作用时间分别为：

$$T4 = 3/2 * (V\alpha - 1.732/3 * V\beta) * T / VDC$$

$$T6 = 1.732 * V\beta * T / VDC$$

同样可以计算出 V_{ref} 在其它扇区内空间矢量的作用时间。不同扇区的 2 个相邻有效矢量的作用时间可归纳为 3 个值 X 、 Y 、 Z 的计算。计算出 X 、 Y 、 Z 后采用多路开关根据不同扇区对两个相邻有效矢量的作用时间 $T1$ 和 $T2$ 赋值。

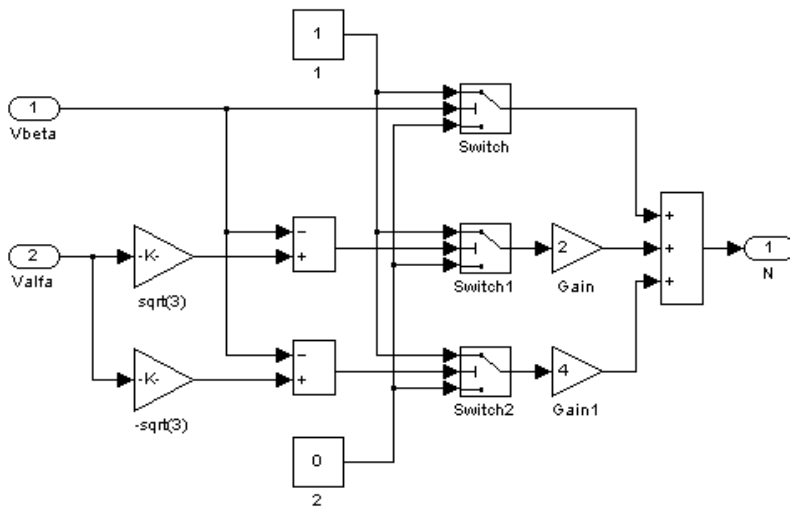


图 4-6 判断 V_{ref} 所处扇区 N 的模型框图

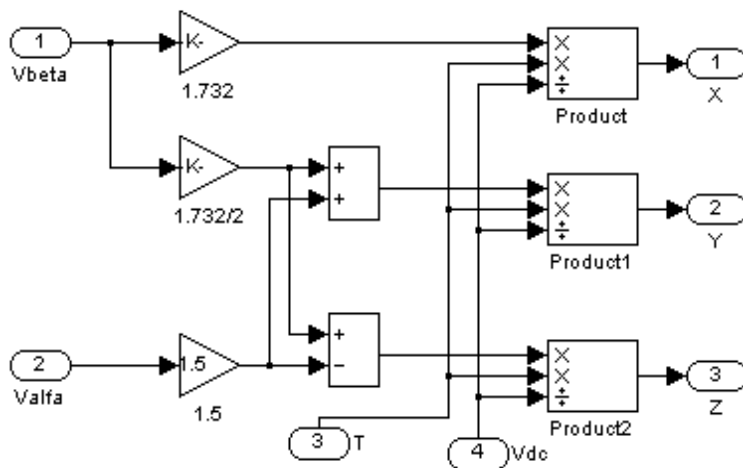


图 4-7 X 、 Y 、 Z 的计算模型框图

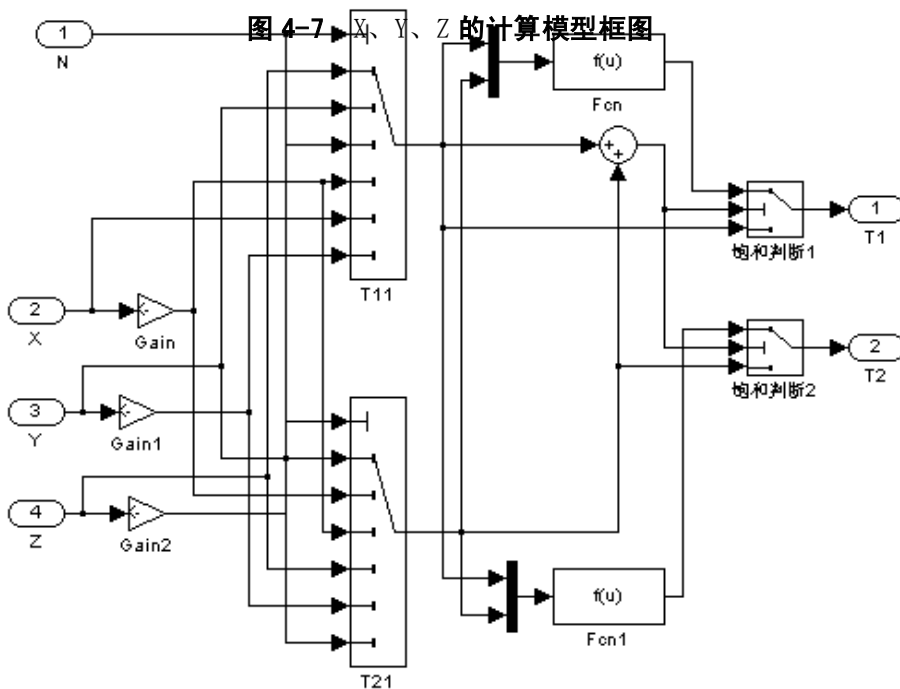


图 4-8 $T1$ 和 $T2$ 赋值计算模型框图

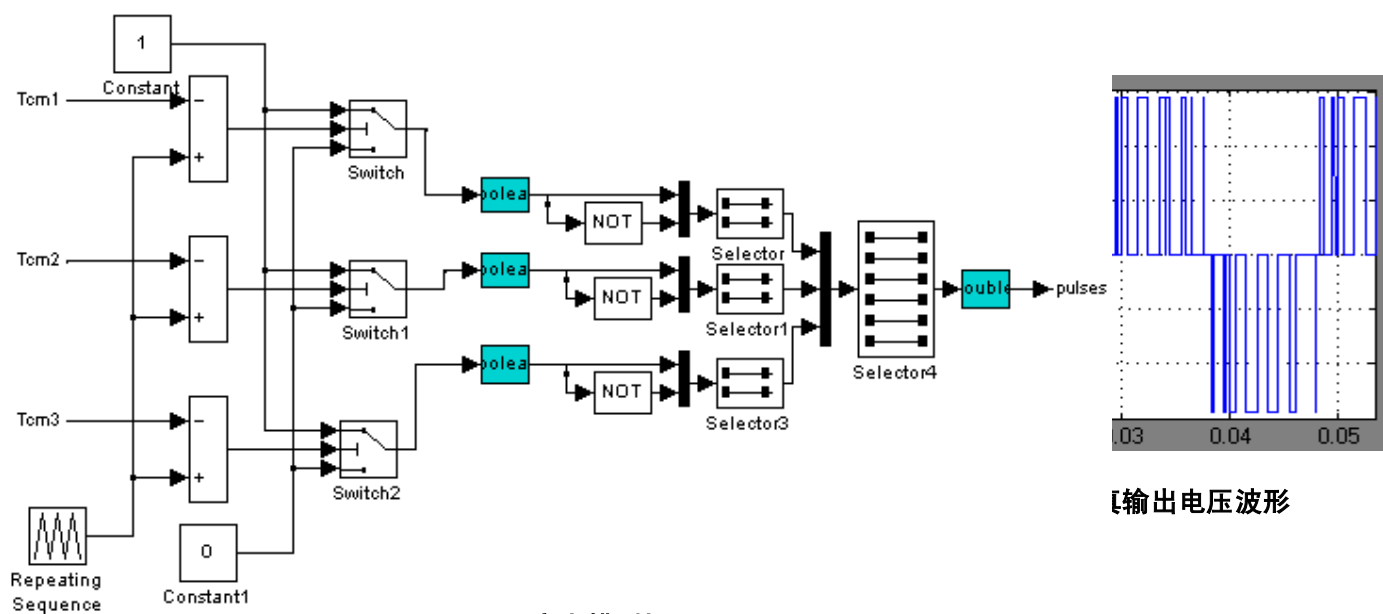


图 4-9 SVPWM 产生模型框图