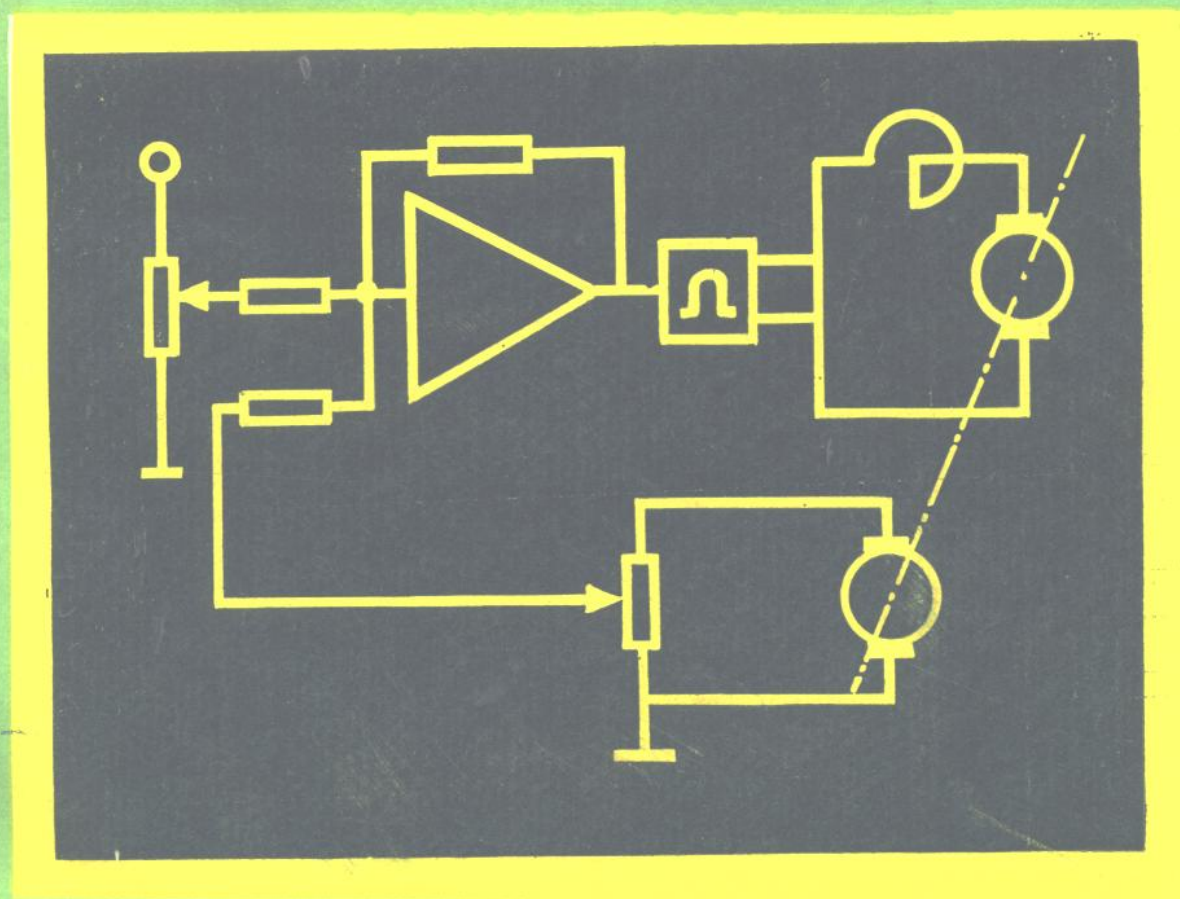


直流控制系统实验 与读图指导

谢宗安 张建峡 编



重庆大学出版社

73.835/818

73.83\$
818

直流控制系统实验与读图指导

谢宗安 张建峡 编

31530/64

重庆大学出版社

前 言

自动控制系统的计算、调试、运行及其工程图纸的阅读是培养学生分析问题、解决问题能力的一种有效的教学手段,是对《电机拖动基础》、《半导体变流技术》、《自动控制理论》、《自动控制系统》等课程的具体综合应用。

1982年工业电气自动化专业《自动控制系统》教材和教学经验交流会议总结了全国各高等院校经验,建议各院校独立设置《自动控制系统计算和实验》课。1983年全国高等学校自动化专业教编委扩大会议提出了《拖动控制系统综合实验》教学大纲(草案)。在后来的教学计划中改名为《专业综合实验》,目前它已成为全国各院校工业电气自动化专业的单列必修课程。

本书以全国统一设计制造的《KZS-1型可控硅直流调速实验装置》和《KSD-1型随动系统实验装置》为基础,参考上述教学大纲(草案)的要求编写而成。全书分两大部分:第一部分提供了关于直流拖动控制系统的9个实验指导,以参数测取—调节器设计—环节调试—系统测试为线索,循序渐进,逐步深化。前后实验内容间的关系是准备条件与深入研究间的关系。因此,学生必须作好充分预习与及时写出实验报告。建议以24学时作为参考学时。第二部分提供了4个直流拖动控制系统电气原理图的读图指导,阐明了电力拖动自动控制系统中常用典型环节功能及系统的组成与工作原理。从反馈控制系统原理与组成的角度出发,拖动控制系统有着很多共性,因此,上述分析可为阅读众多实用拖动控制系统图纸打下良好的基础。建议以8学时插在《自动控制系统》课的理论教学中进行安排。

实验与读图的结合,不仅有利于学生专业技能的培养,而且本书内容所涉均系现代电力拖动控制的基础,因此对电气、自动控制领域的工程技术人员也具有参考价值。

本书由谢宗安、张建峡编写,谢宗安主编。黄明琪副教授审稿,同时得到了贵州工学院工业电气自动化专业实验室的大力支持。编者在此谨致以深切谢意。

由于各院校实验条件不同,且限于编者水平,书中谬误之处难免,衷心欢迎使用本书的师生和读者批评指正。

编 者

一九九〇年一月

目 录

第一部分 实验指导

实验一	KZ-D系统环节特性测定与参数计算	(1)
实验二	单闭环有静差KZ-D系统静态设计与调试	(5)
实验三	不可逆双闭环KZ-D系统设计与调试	(8)
实验四	逻辑无环流可逆系统单元调试	(11)
实验五	逻辑无环流可逆调速系统测试	(16)
实验六	错位无环流可逆系统单元调试	(19)
实验七	错位无环流可逆调速系统测试	(23)
实验八	直流可逆随动系统单元调试	(26)
实验九	直流可逆随动系统测试	(29)

第二部分 读图指导

读图一	不可逆KZ-D调速系统 (附图 1)	(33)
读图二	逻辑无环流可逆调速系统 (附图 2)	(36)
读图三	错位无环流可逆调速系统 (附图 3)	(43)
读图四	直流可逆位置随动系统 (附图 4)	(49)

参考资料	(56)
------------	--------

附图	(56)
----------	--------

- 附图 1 不可逆KZ-D调速系统
- 附图 2 逻辑无环流可逆调速系统
- 附图 3 错位无环流可逆调速系统
- 附图 4 直流可逆位置随动系统

实验一

KZ-D系统环节特性测定与参数计算

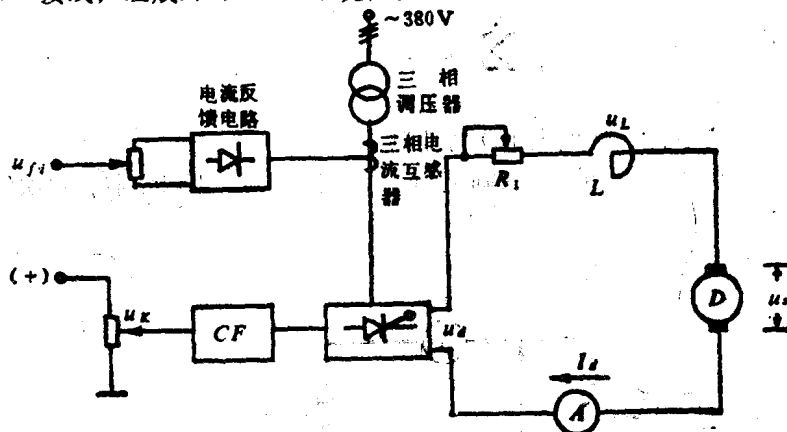
一、实验目的

1. 测取可控硅整流装置(KZ)的控制特性 $u_d=f(u_k)$ 与外特性 $u_d=f(I_d)$ ，计算放大系数 K_s 与内阻 R_s 。(电流连续)。
2. 测取检测环节特性，了解线性范围。包括电流检测环节的 $u_{fi}=f(I_d)$ 与转速检测环节的 $u_{fn}=f(n)$ 。
3. 测算电动机的电枢电阻 R_s ，电枢电感量 L_s ，轴上飞轮力矩 GD^2 。
4. 测算平波电抗器的电阻 R_L 、电感量 L_L 。
5. 求取电动机与电枢回路电磁时间常数 T_s 、 T_L 、机电时间常数 T_m 。

二、实验内容与步骤

1. K_s 、 R_s 、 R_L 、 L_L 的测量与计算

按照图实1-1接线，组成开环KZ-D系统，但电动机不加励磁，使之处于堵转状态。



图实1-1 开环KZ-D调速系统

图中 R_1 为外加电阻箱。为安全起见，控制电枢电流 $I_d=(0.5\sim 1)I_{dL}$ 。

正确选择直流电压表与直流电流表的量程。

- (1) 三相调压器的副边线电压120V左右，改变 u_k 数值，根据表1-1，逐次测量并记录。

表1-1

u_k	
u_d	
u_s	
u_L	
u_{fi}	
I_d	

把 R_1 预放在电阻值最小的位置。

(2) 条件同(1); 并将 R_1 预放在阻值最大的位置。固定某一 u_k , 改变 R_1 , 根据表1-2逐次测量并记录。

表1-2 $u_k = \text{---} \text{V}$

I_d	
u_d	

从以上实验数据可绘制曲线并计算参数如下:

可控硅整流装置(KZ)控制特性 $u_d = f(u_k)$, 计算放大系数

$$K_s = \Delta u_d / \Delta u_k$$

KZ外特性 $u_d = f(I_d)$, 计算内阻。

$$R_n = \Delta u_d / \Delta I_d$$

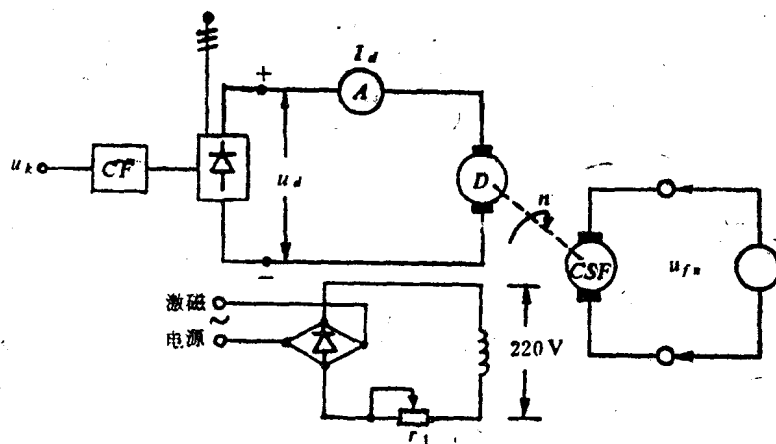
电流检测环节特性 $u_{fi} = f(I_d)$, 进行线性分析。

$$\text{电动机平均枢阻 } \bar{R}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_{si} / I_d)$$

$$\text{平波电抗器平均电阻 } \bar{R}_L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_{Li} / I_d)$$

2. 转速检测环节(测速发电机)特性测试

按图实1-2接线, 即在图实1-1基础上加上电动机励磁, 电机空载, 逐次缓慢增加 u_k , 按表1-3进行测量并记录。



图实1-2 开环KZ-D系统及电动机励磁电路

表1-3

n	
u_{fn}	

绘制曲线 $u_{fn} = f(n)$, 进行线性分析。

3. 电动机轴飞轮力矩 GD^2 测算

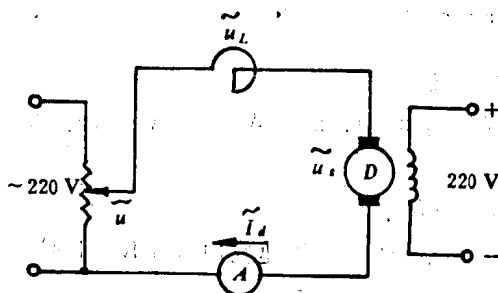
用自由停车法测取。按图实1-2, 保持额定励磁, 将电动机缓慢起动至 $n_s=60\sim 70\%$
 n_{sd} 处, 读取 u_{do} , I_{do} 数值。继续升速至 $n_w=80\sim 90\% n_{sd}$ 处稳定。在突然使 $u_k=0$ 时用记录示
 波器测出自由停车曲线 $n(t)$, 若略去电刷压降与空载损耗, 则

$$GD^2 = \frac{375 M_s}{\left(\frac{\Delta n}{\Delta t}\right)_s} = \frac{375 \times 975 \times \frac{P_s}{n_s}}{\left(\frac{\Delta n}{\Delta t}\right)_s} = \frac{362625 u_{do} I_{do}}{n_s \left(\frac{\Delta n}{\Delta t}\right)_s} \quad (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$$

以上测试原理详见《电机及拖动基础实验指导书》。

4. 电枢与平波电抗器电感量的测算

按图实1-3接线,



图实1-3 电感量测量电路

电动机加额定励磁, 而电枢回路通过调压器改变所加的交流电压 $\tilde{u}$, 使 $\tilde{I}_d \leq (0.5 \sim 1) I_{sd}$, 根据表1-4, 逐次量测与记录。

表1-4

$\tilde{I}_d$	
$\tilde{u}_L$	
$\tilde{u}_s$	

计算: 电枢电感量 L_s

$$Z_s = \frac{\tilde{u}_s}{\tilde{I}_d} \quad L_s = \frac{\sqrt{Z_s^2 - R_s^2}}{2\pi f}$$

平波电感器电感量 L_L

$$Z_L = \frac{\tilde{u}_L}{\tilde{I}_d} \quad L_L = \frac{\sqrt{Z_L^2 - R_L^2}}{2\pi f}$$

对于 L_s , 不加励磁时的值大于加励磁时的值。对于 L_L , 若要考虑直流与交流电流并存的实际情况, 则应采用另外的方法测取, 但也会有数值误差。

5. 计算时间常数

电动机电磁时间常数 $T_s = \frac{L_s}{R_s}$

回路电磁时间常数 $T_L = L_x / R_x$

式中 $L_x = L_s + L_L$ $R_x = R_s + R_L + R_n$

系统机电时间常数 $T_m = GD^2 R_x / 375 C_e C_m$

式中 C_e 、 C_m 可通过计算或测算获取。

三、 实验报告

1. 整理与绘制所测诸特性曲线，并分别计算相应的环节参数或分析工作的线性情况。
2. 计算系统诸时间常数，并说明它们与KZ-D系统动特性之间的关系。
3. 根据诸特性曲线的形状，分析系统的工作范围。
4. 说明图实1-1中 R_L 的功用与选择（阻值、容量）。

四、 实验预习

1. 说明各被测参数的含义。
2. 实验用电动机铭牌为Z₂-32型，2.2kW 220V，12.5A，1500r/min，励磁220V，0.9A，复励。

试用所学知识，预先计算其 R_s 、 L_s 。

3. 说明平波电抗器、电流互感器、测速发电机在KZ-D调速系统中的功用，对它们的特性有何要求？

4. 本实验所测得的 R_n ，为什么应在电流连续条件下测定？

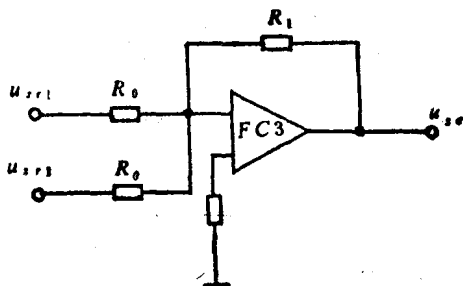
5. 系统时间常数 T_L 、 T_m 的测算，除本实验提供的方法外，还有别的方法，请参考其它资料。

实验二

单闭环有静差KZ-D系统静态设计与调试

一、实验目的

1. 根据静态指标 $S\% \leq 5\%$, $D=10$, 设计单闭环有差系统转速调节器的型式与参数, 并调试系统达到指标。



图实2-1 比例放大电路

2. 熟悉线性组件在调速系统中的应用。
3. 掌握反馈方法, 理解反馈原理。

二、实验内容与步骤

1. 运算放大器的组成与调试

按图实2-1构成由FC3实现的 $K_P=1$, $R_0=20k\Omega$ 的运算放大器, 并进行以下调试:

- (1) 消振: 调节消振电路, 用示波器观察输出信号, 应不含有高频振荡信号。
- (2) 调零: 将全部输入端接地, 调节调零电位器, 使调节器输出为零。
- (3) 测取输入-输出特性线: 应用反号输入端构成反相器, 测取其输入-输出特性。用限幅电路, 调节其输出限幅值 ($\pm 8V$)。

做完以上调试后, 按照所设计的调节器型式与参数, 构成转速调节器。

2. 定脉冲相位

对于三相全控桥式整流电路的锯齿波同步移相触发电路, 应进行以下定相调试:

- (1) 调锯齿波斜率, 用双线示波器观察, 使6块触发板锯齿波的斜率一致。
- (2) 在 $u_k=0$ 时, 调节 $U_{偏}$, 使控制角为 90° 。
- (3) 施加并调节 u_k , 观察控制角平滑变化。
- (4) 检查六相主脉冲顺次相隔 60° , 且各相主补脉冲相隔 60° 。

3. 判断反馈极性, 调节反馈系数 α , 构成闭环系统

按图实2-2, 构成转速负反馈的单闭环KZ-D系统。

图中 R_1 ——ST的反馈电阻;

A_1 ——电枢回路直流电流表;

L ——平波电抗器;

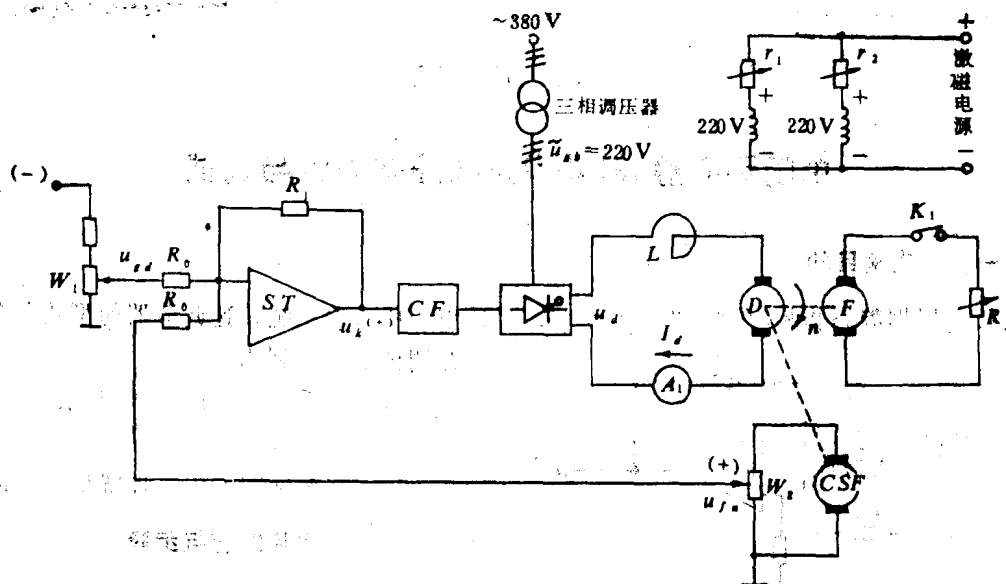
K_1 ——负载开关;

R_f ——负载电阻;

r_1, r_2 ——分别为D和F的外接磁场电阻(滑线电阻)。

先断开转速反馈线, 开环状态下缓慢增加 u_{rd} (调节 W_1), 使电动机转速上升至 $n=1500r/min$, 然后调节 W_2 , 使 $u_{fs}=10V$ 。这时转速反馈系数 α 即已调妥, 将电机停止。

在调整反馈系数 α 的同时要判断反馈极性, 在确认为负反馈之后, 将 u_{fs} 接至放大环节的



图实2-2 有静差闭环调速系统

反馈输入端，接线要接牢，不得松动。

4. 调试系统，使闭环静特性满足指标要求

缓慢起动系统，合 K_1 ，使系统工作于 $I_d = 12.5A$ ，根据 $(\Delta n_{sd})_{\text{稳}} = I_{d0} R_f / C_s (1 + K)$ 所指出的关系，调整转速调节器的 K_f 值，使之满足 $n = 150r/min$ 时 $S\% \leq 5\%$ 。

调试好后，用改变 R_f 的方法，测取低速静特性，记录于表2-1。

表2-1 $u_{ab} =$ $R_1 =$ $\tilde{u}_{ab} = 220V$

I_d	
n	
u_h	

5. 测取开环系统低速机械特性 $n = f(I_d)$

取消转速反馈，合 K_1 ，缓慢起动系统，使之工作于 $I_d = 12.5A$ ， $n = 150r/min$ 。然后改变 R_f ，测取机械特性，记录于表2-2。

表2-2 $u_{ab} =$ $R_1 =$ $\tilde{u}_{ab} = 220V$

I_d	
n	
u_h	

三、实验报告

1. 转速调节器的设计、计算，并画出具体电路，标明元件参数(R_1)的设计值与实际调试值。分析调试中出现的问题。

2. 画出实验线路，画出实验所得两条 $n = f(I_d)$ 特性线，分析两者具有相同调速范围但

$S\%$ 不同的原因。

3. 从闭环系统静特性记录表中就 u_a 随 I_a 的变化而变化说明反馈控制原理。
4. 在调速系统中运用集成电路调节器时应注意哪些问题？

四、实验预习

1. 根据实验一所测算得的参数，设计满足 $D=10$ ， $S\% \leq 5\%$ 指标要求的转速调节器，画出由FC3($R_0=20k\Omega$)构成的调节器电路，考虑 $u_{gdmax}=10V$ 时， $n=1500r/min$ 。
2. 复习变流技术有关内容：锯齿波同步、三相桥式全控整流电路的触发脉冲安排顺序、锯齿波斜率与偏移电压及控制电压三者间的配合等概念。
3. 在图实2-2中如何选择表A与负载电阻 R_f ？
4. 在图实2-2中， u_{gd} 的极性为什么为负？
5. 本实验能否突加 u_{gd} 起动？或在运行中突然大范围改变 u_{gd} 的数值？
6. 分析 K_P （转速调节器比例系数）在确保满足 (D, S) 指标中的作用。

实验三

不可逆双闭环KZ-D系统设计与调试

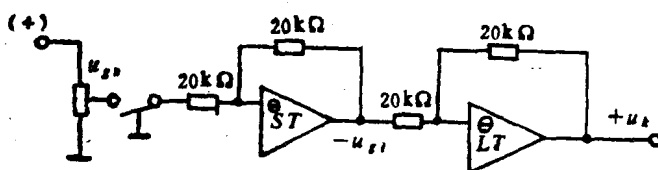
一、实验目的

1. 根据指标要求（见实验内容）设计双环调节器，并依此构成双闭环调速系统。
2. 对双闭环调速系统进行静态整定，并测取系统静特性。
3. 按动态指标要求分别调试电流闭环与转速闭环。
4. 分别测试系统双环的抗扰性能。

二、实验内容和步骤

1. 转速调节器(ST)和电流调节器(LT)的调试

ST、LT之间按图实3-1接线。参考实验二中的实验内容，对ST、LT分别进行调试。



图实3-1 速调(ST)、流调(LT)调零电路

调零时， $u_{in} = 0$ ，先调 $u_{oi} = 0$ ，再调 $u_k = 0$ ，这时ST、LT的其余输入端接地。

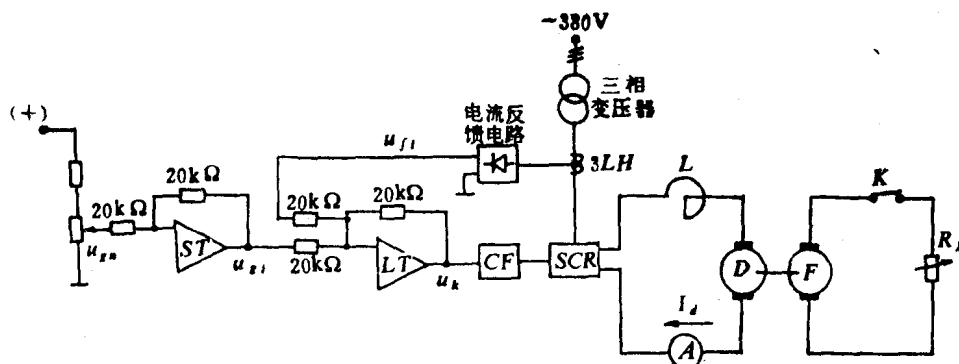
调限幅时， $u_{in} = \pm 10V$ ，先调 $u_{oi} = \pm 8V$ ，再调 $u_k = \pm 8V$ 。

2. 检查触发脉冲相位

按三相全控桥大电感负载条件，有关脉冲零位与移相范围等，参考实验二的类似内容。

3. 电流闭环调试

按图实3-2接线，电动机不加励磁，三相调压器输出电压调至200V。



图实3-2 电流闭环调整电路

(1) 缓慢增加 u_{gn} , 使 I_d 上升, 当判明 u_{fi} 极性后, 按电流负反馈的要求接入 u_{fi} , 构成电流闭环。

(2) 按预习中设计的参数, 构成PI式电流调节器。将电流反馈量调至最大, 合上电源送 u_{gn} , 并使 $u_{gi}=4V$ 。缓慢减小电流反馈量, 可看到主电流上升。当 $I_d=7.5A$ 时(设定过载倍数 $\lambda=1.2$), 停止变动, 并使反馈量固定, 这时电流反馈系数 β 已整定完毕($\beta=?$)。

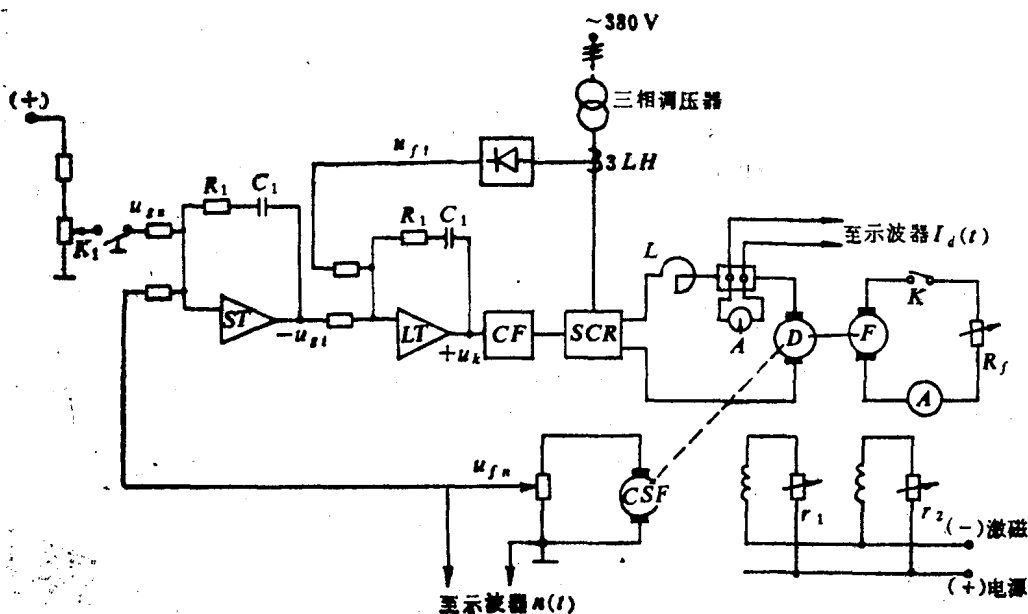
(3) 调 u_{gn} 使 $u_{gi}=-8V$, 作为LT的突加阶跃给定信号, 用慢扫描示波器观察主电流波形 $i_d(t)$ 。按指标 $\sigma\% \leq 5\%$, 调整LT的PI参数, 直至满足指标要求。记下LT的最后参数与波形 $i_d(t)$ 。

(4) 观察电流闭环抗电网扰动能力。调 u_{gn} 改变 u_{gi} , 使 I_d 在 $(0.5 \sim 1)I_{d0}$ 范围内固定。以 $\pm 10\%$ 的电网电压波动, 观察并记录 $i_d(t)$ 的波形, 测取并记录内环的抗扰性能。

4. 转速闭环调试

(1) 在图实3-2基础上, 给电动机励磁, 起动系统, 使 $n=750r/min$, 调 $u_{fn}=-5V$, 在确保转速负反馈前提下接入 u_{fn} 。这时转速反馈系数 α 已整定完毕($\alpha=?$)。

(2) 根据预习时对ST的设计, 按图实3-3接成双闭环调速系统。



图实3-3 不可逆双闭环调速系统

(3) 以 $u_{gn}=+10V$ 作为ST的突加阶跃给定信号, 用慢扫描示波器观察 $n(t)$ 波形。根据指标 $\sigma\% \leq 10\%$, 调整ST的PI设计参数, 直至满足指标要求。记下ST最后参数与 $n(t)$ 波形。系统空载。

由于电流闭环给定来自ST输出, u_{fn} 的波形直接影响到 $i_d(t)$, 进而影响到 $n(t)$ 。为此, 在整定转速环时, 需对电流环参数作适当的调整, 互相补充。这里可看出双闭环系统, 对调试工作带来的方便。

(4) 观测转速闭环抗负载扰动的能力: 电动机加上负载, 合开关K, 使 $I_d=7.5A$, 以 $\pm 10\%$ 负载扰动, 分别观察 $i_d(t)$, $n(t)$ 波形并作记录。

I_d	
n	

5. 静特性测试

合上负载开关K, 调节负载电阻R, 测取静特性并记录于表3-1。

三、实验报告

1. 静态参数最终整定值, 整定依据。

2. 画出电流闭环动态调试线路, 说明调试条件。LT结果参数, 分析它与原设计(预习题中要求设计)参数差别的原因。 $i_d(t)$ 波形与指标。

3. 画出转速闭环动态调试线路, 说明调试条件。ST结果参数, 分析它与原设计(预习题中要求设计)参数差别的原因。 $n(t)$ 波形与指标。

4. 分别画出 $i_d(t)$, $n(t)$ 的抗扰波形, 从波形估计出性能指标。

5. 画出系统静特性, 这时 $D=?$ $S=?$ 与实验二结果进行比较。

四、实验预习

1. 根据实验一所测得的系统参数, 分别设计LT、ST型式与参数, 并以FC3为基本放大器画出它们的电路图。两个闭环的指标:

电流闭环 $\sigma_i\% \leq 5\%$

转速闭环 $\sigma_n\% \leq 10\%$, $\lambda=1.2$ 倍, 空载起动至 n_{nd} 。

2. ST、LT的反馈网络(R, C)参数选择分别与它们所在环的跟随性与抗扰性间有何关系?

3. 就跟随性与抗扰性二个方面分别比较双闭环系统与单闭环系统的优劣, 是否能为本实验所部分证实?

4. 若 $u_{dn}=8V$, $\lambda=1.2$, $I_{da}=12.5A$, 计算 $\beta=?$

若 $u_{dn}=10V$, $n_{nd}=1500r/min$, 计算 $\alpha=?$

5. 怎样实现电网扰动与负载扰动?

6. 双闭环系统应具有什么样的理想的与实际静特性方程?

实 验 四

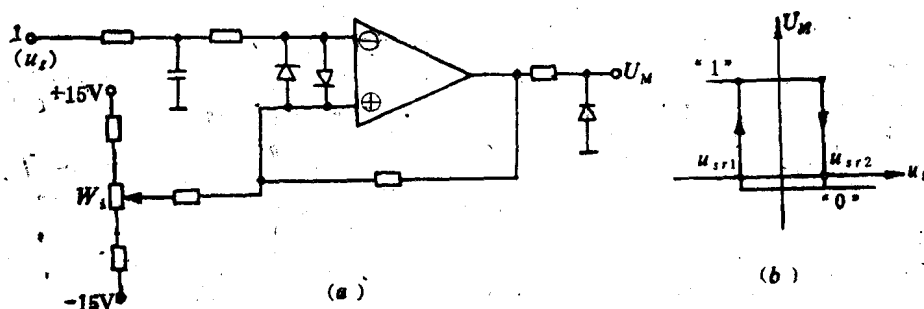
逻辑无环流可逆系统单元调试

一、 实验目的

1. 熟悉逻辑无环流可逆调速系统中各个控制单元的电路结构与工作原理。
2. 测取各个控制单元电路的工作特性，并进行调试。
3. 熟练掌握无环流逻辑装置(LK)逻辑关系的测试方法。

二、 实验内容与步骤

1. 调整转矩极性鉴别器(MJB)的输入-输出特性，测取环宽
按图实4-1(a)测试。



图实4-1 转矩极性鉴别器(MJB)

(a) MJB电路

(b) MJB输入-输出特性

将来自给定环节的输入信号加到1端，用两个万用表分别测取 u_{sr} 和 U_M 。调偏移电位计 W_1 ，使回环对称于 U_M 轴，记录测试数据于表4-1。

表4-1

u_{sr1}	u_{sr2}	U_M 高 电 平	U_M 低 电 平

计算出回环宽度。

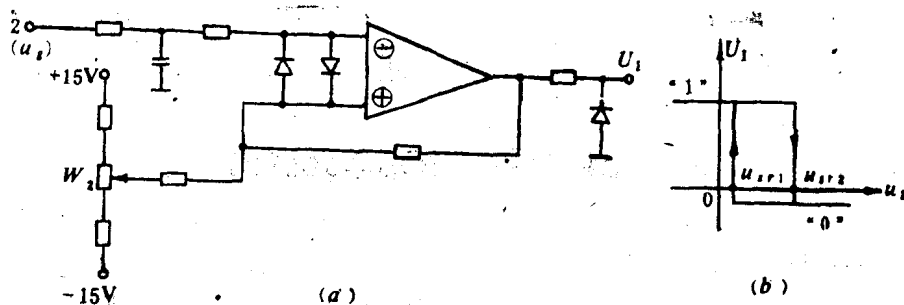
2. 调整零电流鉴别器(LJB)的输入-输出特性，测取环宽
按图实4-2(a)测试。

将来自给定环节的输入信号加到2端，用两个万用表分别测取 u_{sr} 和 U_I 。调偏移电位计 W_2 ，使回环在 U_I 轴右边偏离0.05~0.1V，记录测试数据于表4-2。

计算出回环宽度。

3. 逻辑切换装置(LK)特性测试

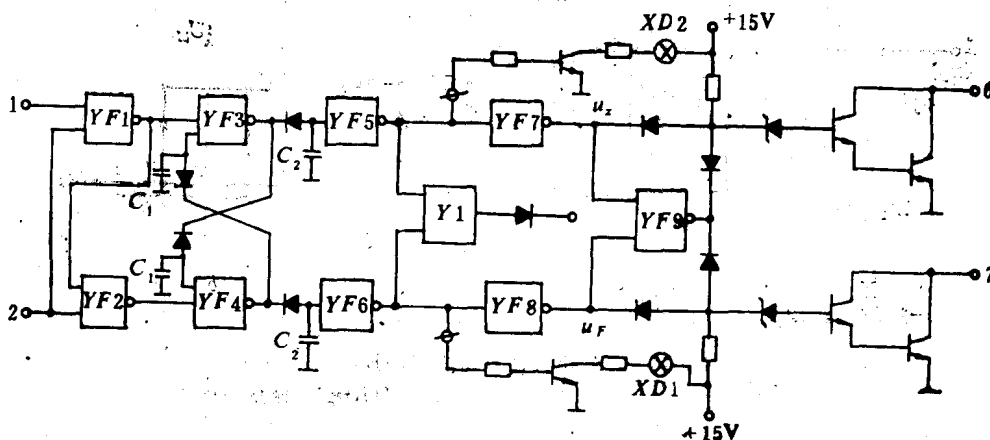
- (1) 静态测试：对LK的静态测试，如图实4-3所示电路。



图实4-2 零电流鉴别器(LJB)
(a) LJB电路 (b) LJB输入-输出特性

表4-2

u_{sr1}	u_{sr2}	U_I 高电平	U_I 低电平



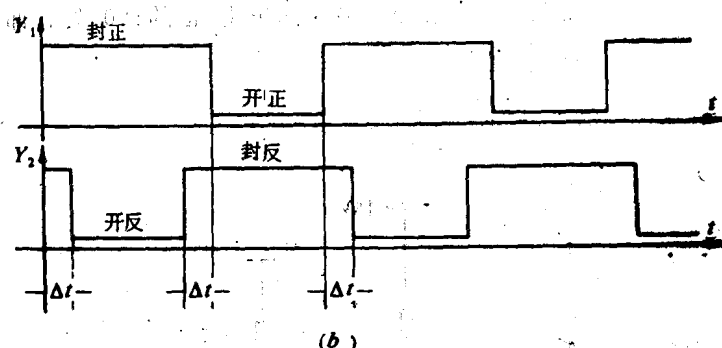
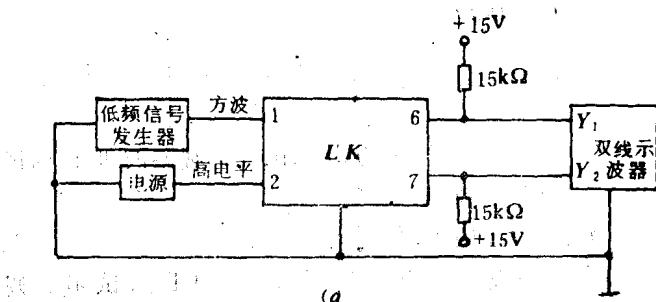
图实4-3 逻辑切换装置(LK)电路

图中1、2两端为LK的输入端，分别接入MJB的输出开关量信号 U_M 和LJB的输出开关量信号 U_I 。6、7两端为LJ的输出端，分别作为正反桥触发电路的开放与封锁信号。输入-输出间关系的静态测试按以下逻辑关系来进行。

表4-3 逻辑关系表

U_M	1	1	0	0	0	1
U_I	1	0	0	1	0	0
u_Z	1	1	1	0	0	0
u_F	0	0	0	1	1	1

实验中，用两个给定环节各自输出的高低电压代替 U_M 、 U_I 所需的1、0信号，而指示灯XD1亮表示正桥开放，即 u_Z 为“1”。指示灯XD2亮表示反桥开放，即 u_F 为“1”。另6、7两端可自由悬空。



图实4-4 LK动态特性测试
(a) 电路框图 (b) 波形图

(2) 动态测试: 为了确保无环流切换, LK中设置了正反桥切换的延时环节, 即前导通桥的关断等待延时与后续桥的触发等待延时, 两个延时总设10ms左右。它直接影响正反桥切换过程中的电流死区。LK的动态测试便可观测这个死区时间。动态测试按图实4-4(a)进行, 这时可观察到图实4-4(b)所示的波形。波形图中的 Δt 即为切换等待延时时间, 过长影响系统的快速性, 过短会导致切换失败。改变图实4-3中的电容器 C_1 及 C_2 便可对 Δt 进行调整。

4. 倒相器测试(DX)

按图实4-5测试。

调零: 将1端接地, 调节

W_1 , 使2端输出为零。

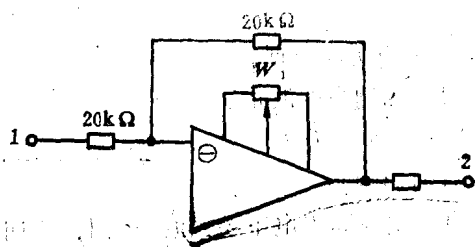
测取输入-输出特性: 将可调给定电压接入1端, 改变输入电压, 分别测取对应的输出, 记录于下表。

表4-4

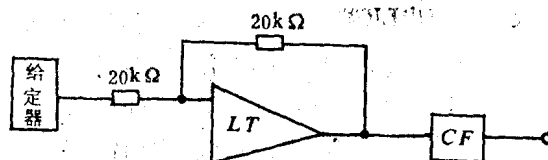
输入 (V)	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
输出 (V)									

表4-5

输入 (V)	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9
输出 (V)									



图实4-5 倒相器(DX)



图实4-6 电流调节器(LT)