

# 浙江大学实验报告

专业：电气工程及其自动化

姓名：潘谷雨

学号：3220102382

日期：2025.4.29

地点：教二 115

课程名称：电机控制 指导老师：孙丹、赵建勇 成绩：

实验名称：晶闸管双闭环不可逆直流调速系统实验

## 一、实验目的和要求

### 1、实验目的

- (1) 了解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) 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
- (3) 研究调节器参数对系统动态性能的影响

### 2、实验报告要求

- (1) 根据实验数据，画出 1200rpm 转速时的闭环机械特性  $n=f(I_d)$
- (2) 根据实验数据，画出系统开环机械特性  $n=f(I_d)$ ，计算静差率，并与闭环机械特性进行比较
- (3) 分析系统动态波形，讨论系统参数的变化对系统动、静态性能的影响

## 二、实验内容和原理

### 1、实验原理

许多生产机械，由于加工和运行的要求，使电动机经常处于起动、制动、反转的过渡过程中，因此起动和制动过程的时间在很大程度上决定了生产机械的生产效率。为缩短这一部分时间，仅采用 PI 调节器的转速负反馈单闭环调速系统，其性能还不很令人满意。双闭环直流调速系统是由速度调节器和电流调节器进行综合调节，可获得良好的静、动态性能（两个调节器均采用 PI 调节器），由于调整系统的主要参量为转速，故将转速环作为主环放在外面，电流环作为副环放在里面，这样可以抑制电网电压扰动对转速的影响。实验系统的原理框图组成如图 1 所示。

系统工作原理如下：启动时，加入给定电压  $U_g$ ，“速度调节器”和“电流调节器”即以饱和限幅值输出，使电动机以限定的最大启动电流加速启动，直到电机转速达到给定转速(即  $U_g=U_m$ )，并在出现超调后，“速度调节器”和“电流调节器”退出饱和，最后稳定在略低于给定转速值下运行。

系统工作时，要先给电动机加励磁，改变给定电压  $U_g$  的大小即可方便地改变电动机的转速。“速度调节器”、“电流调节器”均设有限幅环节，“速度调节器”的输出作为“电流调节器”的给定，利用“速度调节器”的输出限幅可达到限制启动电流的目的。“电流调节器”的输出作为“触发电路”的控制电压  $U_{ct}$ ，利用“电流

调节器”的输出限幅可达到限制 $\alpha_{\max}$ 的目的。在本实验中 DJK04 上的“调节器 I”做为“速度调节器”使用,“调节器 II”作为“电流调节器”使用。

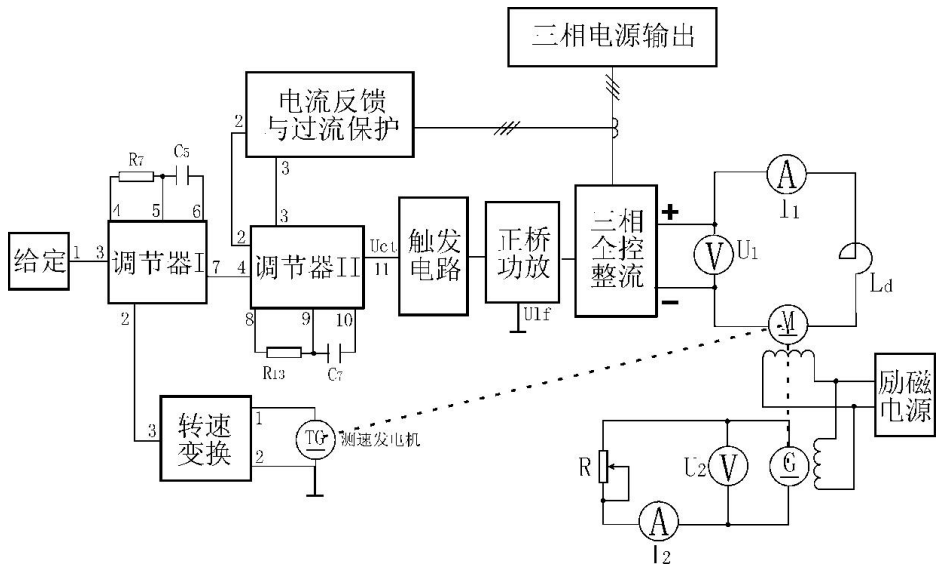


图1 晶闸管双闭环直流调速系统原理框图

2、实验内容

- (1) 了解各控制单元调试
- (2) 了解电流反馈系数 $\beta$ 、转速反馈系数 $\alpha$ 测定方法
- (3) 掌握开环机械特性及高、低转速时系统闭环静态特性  $n=f(I_d)$ 测试方法
- (4) 观察、记录闭环系统转速、电流动态波形

三、 主要仪器设备

序号	型 号	备 注
1	DJDK-3W 电源控制屏	该控制屏包含“三相电源输出”等几个模块。
2	DJK02 晶闸管主电路	
3	DJK02-1 三相晶闸管触发电路	该挂件包含“触发电路”、“正反桥功放”等几个模块。
4	DJK04 电机调速控制实验 I	该挂件包含“给定”、“调节器 I”、“调节器 II”、“转速变换”、“电流反馈与过流保护”等几个模块。
5	DJK08 可调电阻、电容箱	
6	DD03-3 电机导轨、光码盘测速系统及数显转速表	
7	DJ13-1 直流发电机	
8	DJ15 直流并励电动机	
9	D42 三相可调电阻	
10	慢扫描示波器	
11	万用表	

## 四、 操作方法和实验步骤

### 1、双闭环调速系统调试原则

- ①先单元、后系统，即先将单元的参数调好，然后才能组成系统。
- ②先开环、后闭环，即先使系统运行在开环状态，然后在确定电流和转速均为负反馈后，才可组成闭环系统。
- ③先内环，后外环，即先调试电流内环，然后调试转速外环。
- ④先调整稳态精度，后调整动态指标。

### 2、开环系统静态特性测定

- ①DJK02-1 控制电压  $U_{ct}$  由 DJK04 上的给定输出  $U_g$  直接接入，“三相全控整流”电路接电动机， $L_d$  用 DJK02 上的 200mH，直流发电机接负载电阻  $R$ ，负载电阻放在最大值（单组两个 900 $\Omega$ 电阻并联，三组 450 $\Omega$ 并联电阻再相互串联），输出给定调到零。
- ②按下启动按钮，先接通励磁电源，将交流输入电压调节至线电压 200-220V，发电机先空载(负载电阻断开)，从零开始逐渐调大给定电压  $U_g$ ，使电动机转速接近  $n=1200\text{rpm}$ ，然后接入发电机负载电阻  $R$ 。
- ③缓慢增大负载(即减小负载电阻  $R$  阻值)，使得电动机电流逐渐增加，记录转速及电流数据，最终使  $I_d=0.8\text{A}$  左右，可测出该系统的开环外特性  $n=f(I_d)$ ，空载点必测（即负载电阻断开时）。

将滑动变阻器阻值调到最大，将给定退到零，按下停止按钮，断开励磁电源，结束实验。

### 3、闭环系统静态特性测定

- ①按图 1 接线，DJK04 的给定电压  $U_g$  输出为正给定，转速反馈电压为负电压，直流发电机接负载电阻  $R$ ， $L_d$  用 DJK02 上的 200mH，负载电阻放在最大值，给定的输出调到零。
- ②机械特性  $n=f(I_d)$  的测定

发电机先空载(负载电阻断开)，从零开始逐渐调大给定电压  $U_g$ ，使电动机转速接近  $n=1200\text{rpm}$ ，然后接入发电机负载电阻  $R$ ，逐渐改变负载电阻，直至  $I_d=0.8\text{A}$  左右，即可测出系统静态特性曲线  $n=f(I_d)$ ，空载点必测（即负载电阻断开时），并记录数据。

### 4、闭环系统动态特性观察

用慢扫描示波器观察动态波形。在不同的系统参数下(“调节器 I”的增益和积分电容、“调节器 II”的增益和积分电容、“转速变换”的滤波电容)，用示波器观察、记录下列动态波形:

①突加给定  $U_g$  (空载状态), 电动机启动时的电枢电流  $I_d$  (“电流反馈与过流保护”的“2”端) 波形和转速  $n$  (“转速变换”的“3”端) 波形。

②突加额定负载(空载 $\Rightarrow$ 0.5A 左右)时电动机电枢电流波形和转速波形。

③突降负载(0.5A 左右 $\Rightarrow$ 空载)时电动机的电枢电流波形和转速波形。

## 五、实验数据记录和处理

### 1、开环系统

电机转速调节至 1200rpm, 改变负载, 读出转速计与电表数据, 得到实验数据如表 1 所示。

表 1 转速  $n$  与直流电表  $I_d$  数据 (开环系统)

$n/\text{rpm}$	1200	1135	1104	1073	1044	1015	987.2	967.8
$I_d/\text{A}$	0.12	0.25	0.33	0.44	0.52	0.62	0.72	0.80

### 2、闭环系统

#### (1) 静态特性

电机转速调节至 1200rpm, 改变负载, 读出转速计与电表数据, 得到实验数据如表 1 所示。

表 2 转速  $n$  与直流电表  $I_d$  数据 (闭环系统)

$n/\text{rpm}$	1200	1200	1199	1197	1195	1194	1193	1192
$I_d/\text{A}$	0.13	0.26	0.34	0.45	0.561	0.66	0.74	0.80

#### (2) 动态特性观察

##### ①突加给定 $U_g$ (空载状态)

空载状态下突加给定  $U_g$ , 电流  $I_d$  与转速  $n$  波形如图 2.1 所示 ( $I_d$  在上;  $n$  在下, 经过反向操作)。



图 2.1 电流  $I_d$  与转速  $n$  波形 (突加给定  $U_g$ )

在初始状态下，由于转速低于给定值，在电枢电压的作用下，电流迅速上升并达到限幅值。在电流环的调节作用下，电流维持在限幅值附近小幅波动，同时转速快速提升。经过一段动态调节过程后，系统逐渐趋于稳定，转速达到设定值。当转速升高到一定程度后，电枢反电动势的增长速度超过外加电压的调节速度，导致电流开始下降。

## ②突加/突降额定负载(空载 $\Rightarrow$ 0.5A 左右/0.5A 左右 $\Rightarrow$ 空载)

突加或突降额定负载，电流  $I_d$  与转速  $n$  波形如图 2.2 所示 ( $I_d$  在上； $n$  在下，经过反向操作)。

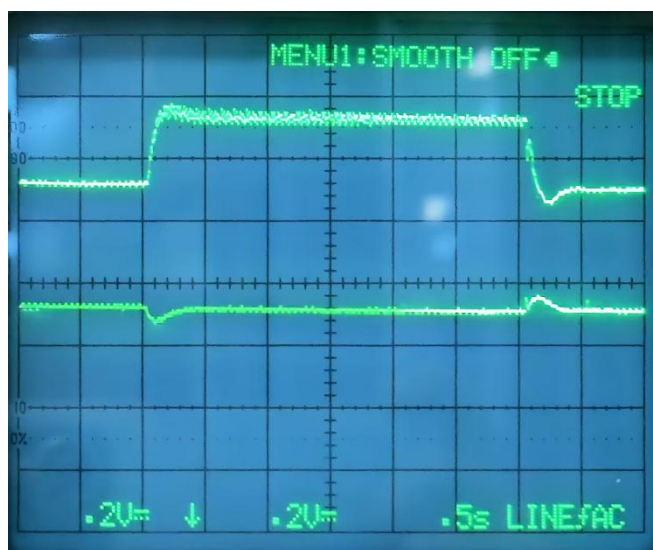


图 2.2 电流  $I_d$  与转速  $n$  波形 (突加/突降额定负载)

当系统突加负载时，由于其闭环控制机制，电流增大以满足负载转矩的平衡。这一过程中，系统通过增加电枢的外加电压来响应负载变化，转速在经历短暂的小幅波动后迅速稳定，基本保持不变。

相反，当系统遭遇突降负载时，由于闭环控制的作用，电流将减小以匹配降低后的负载转矩需求，确保系统的稳定运行。此过程同样通过减少电枢的外加电压来调节，使得转速在出现一个小的抖动之后，很快恢复并维持在一个稳定的水平。

这种快速响应和调节的能力展示了闭环控制系统在应对负载变化时的有效性和稳定性。

## 六、 实验结果与分析

### 1、开环机械特性曲线 $n = f(I_d)$

开环机械特性  $n = f(I_d)$  的曲线如图 1.1 所示

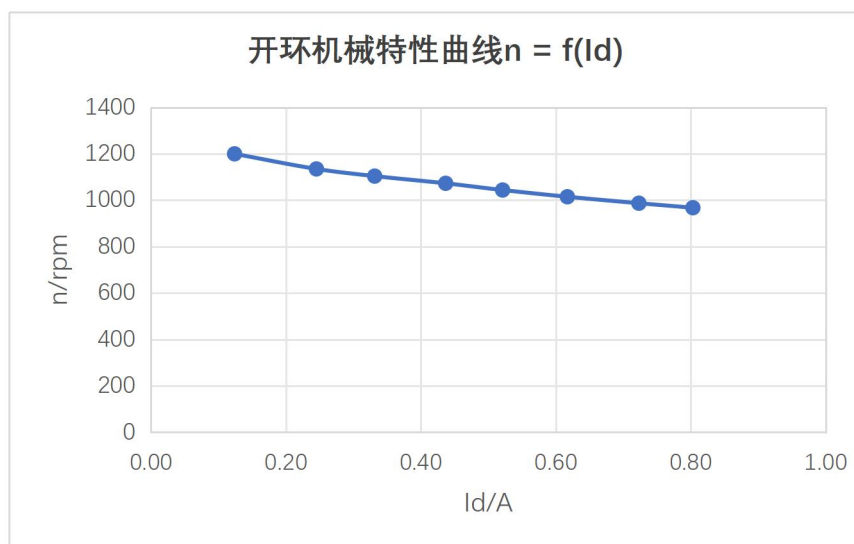


图 1.1 开环机械特性  $n = f(I_d)$  曲线

根据作图所得曲线可知，随着电流（负载）的增加，电磁转矩增大，电动机转速下降，下降曲线近似为一条直线。符合电机理论机械特性曲线特性，符合实验预期。

当  $I_d = 0.8A$  时，电机转速为 967.8rpm，根据公式计算得到开环静差率  $s = \frac{n_0 - n}{n_0} \times 100\% = 19.35\%$

## 2、闭环机械特性曲线 $n = f(I_d)$

闭环机械特性  $n = f(I_d)$  的曲线如图 2.3 所示

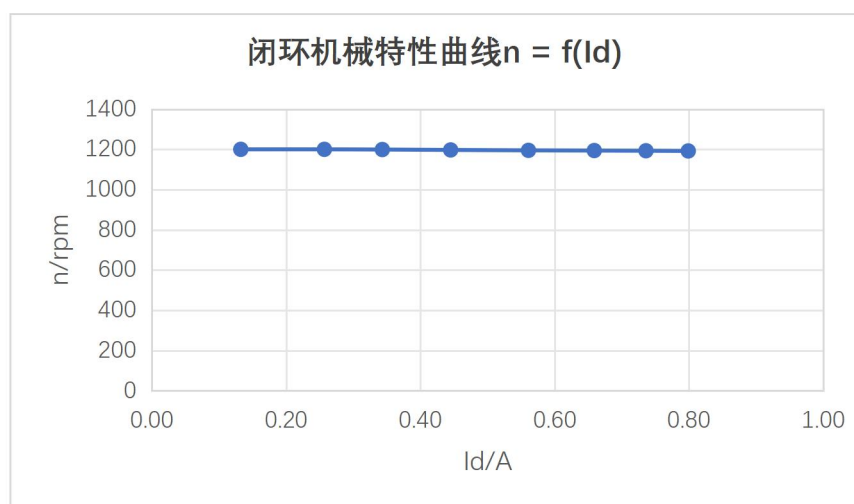


图 2.3 闭环机械特性  $n = f(I_d)$  曲线

根据曲线可知，随着电流（负载）的增加，电磁转矩也随之增大。然而，由于系统采用了闭环负反馈

控制机制，外加电压会相应调整，从而使得转速能够基本保持恒定，维持在一个稳定的状态。这一结果与预期相符，验证了闭环控制系统在调节转速方面的有效性。

从图中对比可以看出，相比于开环系统，闭环系统具备显著的转速调节能力。它能够依据预设的转速给定值，在负载发生变化时，通过自动调节电枢电压来补偿负载变化带来的影响，确保系统的转速稳定。这体现了闭环系统在面对负载波动时拥有更优的调速效果和更高的稳定性。

### 3、闭环系统动态特性

分析系统的动态波形时主要关注比例增益（ $K_p$ ）、积分增益（ $K_i$ ）和微分增益（ $K_d$ ）对系统动、静态性能的影响。

比例增益（ $K_p$ ）：动态性能上，增加  $K_p$  值通常可以加快系统的响应速度，使系统更快地达到设定值；然而，过高的  $K_p$  可能导致系统超调量增大，即实际输出超过设定值的程度加大，并可能引起振荡。静态性能上，虽然较高的  $K_p$  有助于减小稳态误差，但它并不能完全消除这一误差；如果  $K_p$  设置得过大，可能导致系统不稳定。

积分增益（ $K_i$ ）：动态性能上，提高  $K_i$  值可以增强系统对稳态误差的校正能力，有助于完全消除该误差；但是， $K_i$  值过高容易导致系统变得不稳定，表现为响应曲线出现振荡或持续波动。静态性能上， $K_i$  的主要作用是消除长期存在的稳态误差，若  $K_i$  过小，则其纠正稳态误差的效果不明显；若  $K_i$  过大，可能会导致系统在到达设定点后仍然振荡。

微分增益（ $K_d$ ）：动态性能上， $K_d$  的作用在于预测误差的变化趋势并提前做出调整，从而有效减少超调量和振荡现象，改善系统的响应特性。适当增加  $K_d$  可以使系统更加稳定和平滑。静态性能上，微分控制对静态性能影响较小，主要是通过改善动态响应来间接影响系统的整体稳定性。

## 七、思考、心得与体会

### 1、实验心得与体会

通过本次实验，我对直流电动机双闭环控制系统的结构、原理及其工程实现有了更加全面的认识。不仅加深了我对转速环与电流环控制策略的理解，也增强了我在实际操作中连接电路、调试系统以及分析波形的能力。通过动手实践，我将课堂上学到的理论知识应用到了真实系统中，特别是在参数整定和系统响应分析方面有了更深刻的体会。此外，实验过程中遇到了电流有两个尖峰的情况，改变电容值后调试可改善波形，提升了我分析问题和解决问题的能力。这不仅是一次技术上的锻炼，更是对工程思维和实践素养的一次重要培养。

总而言之，本次实验过程较为顺利，内容充实，不仅巩固了我的专业知识，也激发了我对电机控制及

自动控制系统进一步学习和探索的兴趣。

## 2、思考题：

### （1）为什么双闭环直流调速系统中使用的调节器均为 PI 调节器？

当仅有比例控制时，系统输出存在稳态误差。为了消除稳态误差，在控制器中必须引入积分项。积分项的误差取决于时间的积分，随着时间的增加，积分项会增大。因此即使误差很小，积分项也会随着时间的增加而加大。它推动控制器的输出增大，使稳态误差进一步减小，直到等于零。因此，比例 P 与积分 I 控制结合,可以使系统在进入稳态后无稳态误差。

### （2）转速负反馈的极性如果接反会产生什么现象？

转速负反馈的极性如果接反会使系统变为正反馈，系统失去转速调节作用。一旦发生扰动，转速将持续增大，无法达到稳定转速状态，造成失控。

### （3）双闭环直流调速系统中哪些参数的变化会引起电动机转速的改变？哪些参数的变化会引起电动机最大电流的变化？

改变给定参考转速、磁通、反馈回路的系数均会引起电机转速的改变，负载扰动和电压波动会导致电机转速的变化，但是会通过反馈自动调节转速恢复为原来的值。

转速调节器输出限幅值决定了电动机允许的最大电流，改变限幅值可以改变电动机最大电流。