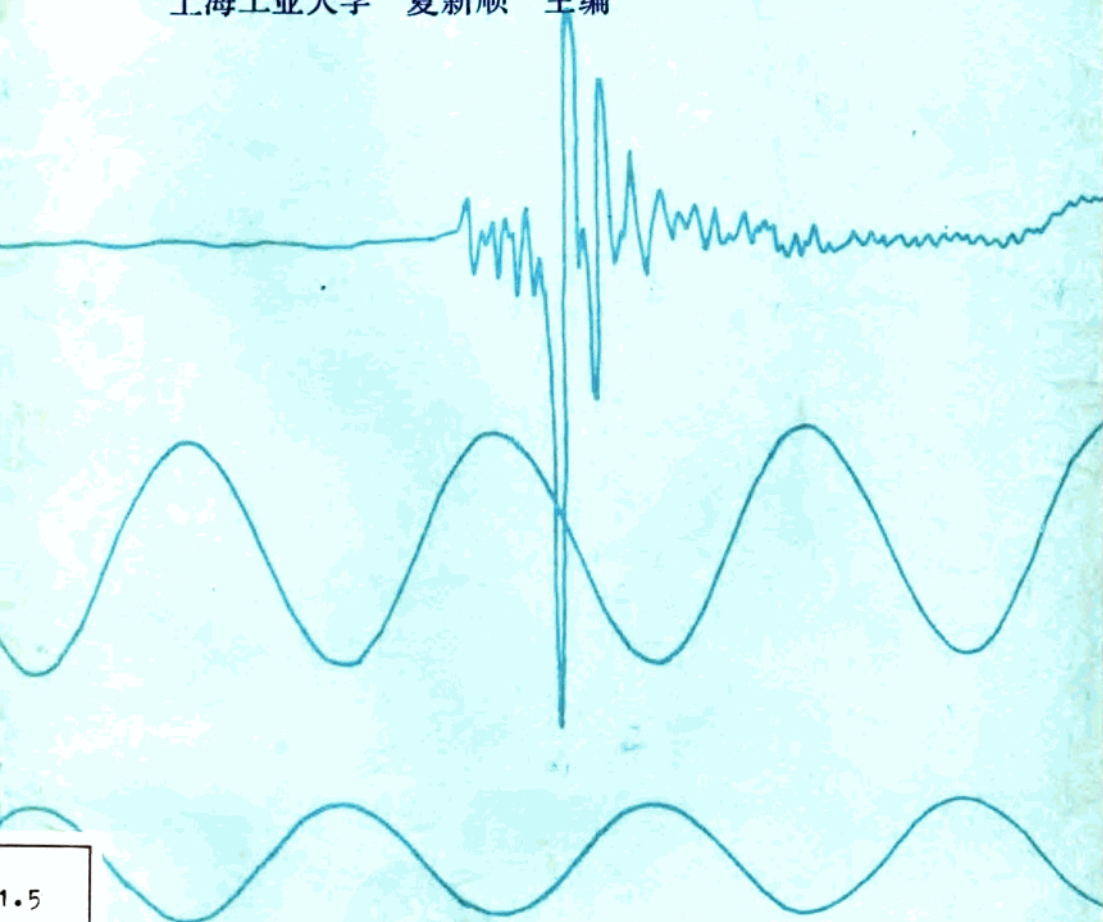


拖动自动控制系统实验指导

上海工业大学 夏新顺 主编



机械工业出版社

本书是工业电气自动化专业“直流拖动自动控制系统”和“交流调速系统”两门专业课程包括“拖动控制系统综合实验”课程的实验指导教材，可作为学生准备和进行实验的指南。

全书共分六章，主要包括直流调速系统、随动系统、交流调速系统等实验以及有关实验装置介绍和实验仪器及测试方法等。

本书可供高等工业学校工业电气自动化、自动控制、应用电子技术、电机及其它自动化专业学生作实验教学用书，亦可供从事机电控制设备试验工作的工人和有关工程技术人员参考。

拖动自动控制系统实验指导

上海工业大学 夏新顺 主编

*

责任编辑：贾克勤

封面设计：方 芬

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $10 \frac{1}{2}$ · 字数 245 千字

1988年6月北京第一版·1988年6月北京第一次印刷

印数 0,001—5,400 · 定价：1.80 元

*

ISBN 7-111-00162-1/TM · 33 (课)

前 言

本书是根据全国高等工业学校自动化类专业教材编审委员会1983年福州会议上拟定的教学计划及“拖动自动控制系统实验指导”编写大纲进行编写的,内容包括:绪论、直流调速系统实验、随动系统实验、交流调速系统实验、实验装置介绍和有关实验仪器及测试方法等。

拖动自动控制系统实验课是专业教学的一个重要环节,也是拖动自动控制系统课程的重要组成部分,它能使學生通过实验验证理论的正确性、培养学生实践动手能力、以及分析问题和解决问题的独立工作能力,还可培养学生勇于探索、善于改革、具有创造性的开拓精神和严肃认真、实事求是的科学作风。本书是配合“直流拖动自动控制系统”和“交流调速系统”二门课程编写的“实验指导”,侧重于介绍具体原理和实验要求及方法。

书中所列教学实验内容可根据专业需要和设备条件选做,每个实验大体按3学时安排。本书可供高等工业学校工业电气自动化、自动控制、应用电子技术、电机及其它自动化专业学生作实验教学用书,另外亦可供从事机电控制设备试验工作的工人和有关工程技术人员参考。

本书由上海工业大学夏新顺副教授主编,并负责编写第一章、第二章、第五章中§5-1与§5-2以及附录一,南京工学院钟福金副教授编写第三章、第五章中§5-3与§5-4,福州大学徐书确副教授编写第四章、第五章中§5-5与§5-6以及附录二,机械工业部情报所周斌高级工程师编写第六章。

本书由上海工业大学陈伯时教授主审,参加审稿工作的还有上海交通大学陈敏逊副教授、同济大学袁国华副教授、上海冶金专科学校余人杰副教授、浙江大学童福尧副教授、中国纺织大学徐银泉副教授、上海第二工业大学葛渝生同志。他们在审阅中提出了许多宝贵意见,编者在此谨致谢意。

由于编者业务水平和教学经验有限,错误和不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

1986年12月

符 号 表

一、参数和物理量常用符号

C	电容	n_{ed}	额定转速
C_e	机电势常数(当磁通为额定值时)	n_0	理想空载转速
C_m	电机转矩常数(当磁通为额定值时)	P	功率
D	调速范围	P_{ed}	额定功率
E	电势, 电机反电势	P_K	空载功率
E_{ed}	额定电势	P_M	电磁功率
E_2	变压器副边额定相电压(有效值)	P_o	空载损耗
e_0	随动系统静态误差	P_r	转差功率
e_{sv}	随动系统速度跟踪误差	P_{re}	输出功率
f	频率	P_{ri}	输入功率
GD^2	飞轮惯量(也称飞轮矩)	P_W	输入总功率
I, i	电流(大写为平均值, 小写为瞬时值, 下同)	R	电阻
I_d, i_d	整流电流	R_s	变阻器
I_f	发电机电流	R_{fs}	负载电阻
I_{fs}	稳态负载电流	R_L	平波电抗器电阻
I_K	空载电流	R_n	晶闸管整流装置内阻
I_L	直流电机励磁电流	R_q	起动电阻
I_m	异步电机励磁电流	R_r	电枢电阻
i_m	电流极值	R_W	电位器
K	开环增益, 闭环系统开环总放大倍数	R_Z	电枢回路总电阻
K_f	转速与转矩的变换系数	R_{zf}	转子总电阻
K_m	电机的转矩变换系数	$R_{zf'}$	转子折算到定子的总电阻
K_p	比例放大倍数	r_2	转子电阻
K_r	晶闸管装置放大倍数	r_f	转子附加电阻
K_o	移相触发器放大倍数	S	转差率
L	电感, 电枢回路总电感	S_z	转速给定指令数
L_B	整流变压器漏感	T	时间常数
L_L	平波电抗器电感	T_e	机电时间常数
L_e	电动机电枢电感	T_f	动态恢复时间
M	电动机电磁转矩	T_i	电磁时间常数
M_{ed}	额定转矩	T_m	机电时间常数
M_{fs}	负载转矩	T_p	过渡过程时间
M_K	空载转矩	T_s	阶跃升速时间
M_n	扰动转矩	t	时间
MY	压敏电阻	U	电压
n	转速	U_e	电枢电压
		U_{ef}	测速发电机电压

U_d	整流电压
U_{d0}	理想空载整流电压
U_{ed}	额定电压
U_f	发电机电压, 反馈电压
U_{fi}	电流反馈电压
U_{fn}	转速反馈电压
U_{fu}	电压反馈电压
U_{gd}	给定电压
U_{gi}	电流调节器给定电压
U_{gn}	转速调节器给定电压
U_k	触发装置控制电压
U_{LTmax}	电流调节器最大输出电压
U_M	转矩极性鉴别信号 (开关量)
U_i	零电流检测信号 (开关量)
$U_{..}$	输出电压
$U_{..}$	输入电压
U_{STmax}	转速调节器最大输出电压
U_c	补偿电压
U_s	指令电压
$W(s)$	传递函数, 开环传递函数
X	电抗
X_1	定子电抗
X_2	转子电抗
X'_2	转子折算到定子端电抗
Z	总阻抗
Z_L	平波电抗器交流电抗
Z_s	电枢交流阻抗
α	晶闸管控制角
α_n	转速反馈系数
α_{min}	最小控制角
β	晶闸管逆变角, 电流反馈系数
β_{min}	最小逆变角
γ	电压反馈系数
δ	随动系统死区
θ	晶闸管导通角, 机械转角
$\theta_{..}$	输出角
$\theta_{..}$	输入角
λ	电机允许的过载倍数
τ	调节器时间常数
Φ	磁通
ξ	阻尼系数
σ	控制系统跟随给定过渡过程的超调量

ω	角频率
ω_c	频率特性的截止频率
ω_s	转差角频率
ω_1	定子角频率
ω_2	转子角频率

二、元件与装置常用符号

A	电流表
A/D	模数转换装置
B	变压器
BK	拨盘开关
BT	备用调节器
C	接触器
CF	移相触发装置
CSF	测速发电机
D	电动机, 二极管
DJ	电平检测器
DK	电子模拟开关
D_L	电动机励磁绕组
DW	单稳态触发器
D_v	稳压管
DX(DT)	倒相器
EM	译码器
F	发电机
F_L	发电机励磁绕组
FKZ	反组晶闸管整流桥
FP	分频器
FS	过电流封锁保护
FX	反相器
FZ	负载
GD	给定器
GL	过流保护环节
GS	跟随器
GZ	硅整流器
HB	函数变换器
HF	函数发生器
HK	三相闸刀开关
HL	电流互感器
HXF	环形分配器
J	继电器
JC	三相零式整流桥, 交流接触器
JD	交流电动机
JF	绝对值放大器

JL 集成电路
 JZ 晶体振荡电路
 K 开关
 KF 控制式自整角发送机
 KFP 可控分频器
 KJ(KJS) 可逆计数器、控制式自整角接收机
 KZ 晶闸管, 晶闸管装置
 L(LDK) 平波电抗器
 LB 电流变送器, 低通滤波器
 LF 电流反馈环节
 LH 电流互感器
 LJB 零电流检测器
 LK 无环流逻辑控制器
 LSF 零速封锁器
 LW 零位保护门
 LX 电流符号选择器
 LT 电流调节器
 MF 脉冲放大器
 MJB 转矩极性鉴别器
 MT 同步控制门
 NB 逆变变压器
 NQ 逆变桥
 PHT 频率合成调节器
 PS 频率设定调节器
 QA 起动按钮
 RD 熔断器
 SB 转速变换器
 SBJ 数字比较器
 SC 门锁控制门
 SD 伺服电动机
 SF 转速反馈环节
 SMB 数模变换器
 SPB 数字频率变换器

ST 转速调节器
 SX 锁相环
 T 晶体管, 三极管
 TA 停止按钮
 TB 同步变压器
 TX 同相器
 V 电压表
 UF 电压频率变换器
 WJ 差频误差积分电路
 WT 微分调节器
 XBJ 相位比较器
 XC 选择触发器
 XF 旋转变压器发送机
 XJ 旋转变压器接收机
 YB 电压变送器
 YF 运算放大器, 与非门, 电压反馈环节
 YG 电压隔离器
 YKZ 压控振荡器
 YS 延时继电器, 显示器
 YT 电压调节器
 ZD 直流电动机
 ZF 直流发电机
 ZFK 正反转开关
 ZK 自动开关
 ZKZ 正组晶闸管整流桥
 ZL 指令电路
 ZLB 整流变压器
 ZMB 转角脉冲变换器
 ZOB 自耦变压器
 ZQ 整流桥
 ZT 转速误差调节器

凡文中带*号的均为选做项目

目 录

符号表

第一章 绪论	1
§ 1-1 拖动自动控制系统实验的特点和要求	1
§ 1-2 实验进行方式	1
§ 1-3 安全操作注意事项	3
第二章 直流调速系统实验	4
§ 2-1 晶闸管—电动机系统参数和环节特性的测定	4
§ 2-2 带电流正反馈及电流截止负反馈的电压负反馈单闭环调速系统（用单相桥式 半控整流电路）	13
§ 2-3 带电流截止负反馈的转速单闭环调速系统（用三相零式或桥式电路供电）	16
§ 2-4 双闭环不可逆调速系统（用三相全控桥供电）	20
§ 2-5 逻辑无环流可逆调速系统（用三相桥式或零式反并联电路供电）	24
§ 2-6 错位选触无环流可逆调速系统（用三相桥式或零式反并联电路供电）	28
§ 2-7 数字给定差频积分补偿式高精度调速系统	32
§ 2-8 数字给定鉴频锁相补偿式高精度调速系统	37
§ 2-9 逻辑和错位（选触）无环流可逆直流调速系统示范实验	41
§ 2-10 数字式高精度调速系统示范实验	42
第三章 随动系统实验	45
§ 3-1 自整角机随动系统	45
§ 3-2 粗—精测双通道随动系统	48
§ 3-3 锁相随动系统	53
第四章 交流调速系统实验	56
§ 4-1 电磁滑差离合器调速系统	56
§ 4-2 异步电动机调压调速系统	59
§ 4-3 异步电动机串级调速系统	64
§ 4-4 异步电动机变频调速系统	67
第五章 实验装置介绍	72
§ 5-1 KZS-1型晶闸管直流调速实验装置	72
§ 5-2 JST-1型高精度数字调速实验装置	87
§ 5-3 KSD-1型晶闸管直流随动系统实验装置	97
§ 5-4 MSD型脉冲相位—脉冲宽度随动系统实验装置	103
§ 5-5 CTS-1型串级调速系统实验装置	108
§ 5-6 KBS-1型变频调速系统实验装置	112
第六章 实验仪器及测试方法	121
§ 6-1 数字式频率计	121
§ 6-2 数字式复用表	124
§ 6-3 慢扫描电子示波器	126

VI

§ 6-4 记忆示波器	128
§ 6-5 存储示波器	134
§ 6-6 磁电式光线示波器	137
§ 6-7 笔式记录仪	144
附录	149
附录一 自动控制系统课程设计与综合实验大纲	149
附录二 设计双闭环串级调速系统的理论计算方法	150
参考文献	156

第一章 绪 论

§ 1-1 拖动自动控制系统实验的特点和要求

拖动自动控制系统实验课的目的在于培养学生掌握基本的实验方法和操作技能,特别着重于对学生能力的培养,包括自学能力、动手能力、组织能力、数据分析处理能力、运用理论解决实际问题的能力、初步科研实验能力、文字表达能力等,本课程的特点是综合性和实践性强,涉及面广,实验时不宜一人单独进行,须分组协同工作,它是配合直流拖动自动控制系统和交流调速系统理论教学的重要环节,是理论教学的补充与继续,而理论教学又是实验教学的基础,实验中学生可灵活运用所学自动控制理论及自动控制系统的知识,学会分析和解决实际系统中出现的问题,培养实践动手能力,同时验证理论,加强理论与实践的统一,实践—理论—再实践,可使认识不断提高、深化,并进一步能有所发现,有所创新。

全书共分六章,第二、三章是配合“直流拖动自动控制系统”课程进行安排的。第二章的10个实验中,要求根据条件必做2~3个,其中§2-1也可放在自动控制系统大实验中进行;§2-2和§2-3均为单闭环系统,可任做一个,其重点在于巩固反馈的概念和作用以及机械特性和静特性的比较;§2-4双闭环系统是必做内容,重点在于闭环静特性,特别是下垂特性研究,以及初步的动态特性分析;§2-5、§2-6、§2-9是可逆系统研究,可根据条件选做其中一个,重点在于可逆切换方式研究;§2-7、§2-8、§2-10是高精度数字调速系统,有条件的可选做其中一个,重点在于提高静态精度的方法研究和数字化方法。第三章3个实验中要求选做1个,重点在于掌握随动系统静态误差、速度跟踪误差和动态指标的研究。第四章是配合“交流调速系统”课程编写的,4个实验中要求选做1~2个,其中重点是交流串级调速和变频调速,串级调速系统中主要研究其力能指标、效率和功率因数,变频调速系统则主要研究其变频电路的波形以及恒磁通的变频机械特性。为配合实验工作的进行和学生预习准备,在最后二章中介绍了部分实用的实验装置和实验仪器,但这些装置和仪器都不是唯一的。

§ 1-2 实验进行方式

为了提高效率、讲求实效、取得预期的收获,拖动自动控制系统实验建议按以下方式进行。

一、实验预习

预习是实验前的重要准备工作,是保证实验顺利进行的必要步骤,也是培养学生独立工作能力、提高实验质量与效率的重要环节,要求做到:

- (1) 实验前应复习有关课程的章节,熟悉有关理论知识。
- (2) 认真阅读实验指导及有关实验装置介绍,了解实验目的、内容、方法、要求和系

统工作原理,明确实验过程中应注意的问题,有些内容可到实验室对照实物预习(如熟悉所用仪器设备,抄录被试机组的铭牌参数,选择设备、仪器、仪表)。

(3) 画出实验线路,明确接线方式,拟出实验步骤,列出实验时需记录的各项数据表格,算出要求事先计算的数据。

(4) 实验预习分组进行,每组2~4人,每人都需预习,实验前可每人或每组写一份预习报告。各小组在实验前应讨论一次,明确组长,合理分工,预测实验结果及大致趋势,做到心中有数。

二、实验进行

整个实验过程中必须严肃认真,集中精力及时做好实验。

1. 预习检查、严格把关

实验开始前由指导教师检查预习质量(包括对本次实验的理解、认识及预习报告),当确认已做好了实验前的准备工作方可开始实验,对于因没有预习而对本次实验的目的、内容、方法、要求了解很差的同学,应拒绝其实验。

2. 分工配合、协调工作

每次实验以小组为单位进行,组长负责实验的安排,如分配记录、接线、起动操作、调节负载、测量转速及其他物理量等工作,务求在实验过程中人人动手、个个主动、分工配合、协调操作,做到实验内容完整、数据正确。

3. 按图接线、力求简明

根据拟定的实验线路及选用的仪表设备,按图接线,力求简单明了。接线原则是先串联后并联。即由电源开始先连接主要的串联电路,例如单相或直流电路,从一极出发,经过主要线路的各仪表、设备,最后返回到另一极。串联电路接好后再把并联支路逐段并上。主回路与控制回路应分清,根据电流大小,主回路用粗导线连接,控制回路用细导线连接,每个接线柱上的接线尽量不超过二根。

4. 确保安全、检查无误

为了确保安全,线路接好后应互相校对或请指导教师检查,确认无误后方可合闸通电。

5. 按照计划、操作测试

按实验步骤,由简到繁、逐步进行操作测试,实验中要严格遵守操作规程和注意事项,仔细观察实验中的现象,认真做好数据测试工作,并结合理论分析与预测趋势相比较,判断数据的合理性。

6. 认真负责、完成实验

实验完毕,应将记录数据交指导教师审阅,经指导教师认可签字后才允许拆线、整理现场,并做到导线分类整理,仪表、工具物归原处。

三、实验报告

实验报告是实验工作的总结、提高和最后成果,也是对学生分析能力和工作能力的进一步培养锻炼,因此必须独立书写,每人一份,应对实验数据及实验中观察和发现的问题,进行整理讨论、分析研究,得出结论,写出心得体会,以便积累一定的实际经验。

编写实验报告应具有严肃认真的科学态度,报告要求条理清楚、简明扼要,字迹端正、图表整洁,分析认真、结论明确。

实验报告内容主要包括以下几方面

- (1) 实验名称、专业班级、组别、姓名、同组同学姓名、实验日期。
- (2) 列出实验用机组以及主要仪表设备的型号、规格和编号。
- (3) 实验目的和要求。
- (4) 绘出实验时所用的线路图。
- (5) 写出实验项目、调试步骤，总结调试方法。
- (6) 整理实验数据，在记录数据的表格上应注明试验条件，某些数据如系计算所得，应列出计算公式，并举例说明。
- (7) 画出实验所得的曲线波形(或附有关照片)，例如电压和电流波形、转速变化曲线、输入输出关系曲线等，并应注意各图形之间的位置对应关系，曲线要用曲线尺或曲线板连成光滑曲线(不在曲线上的点仍按实际数据标出)，对这些数据和图形加以分析总结，得出明确结论。
- (8) 分析讨论实验中遇到的问题，写出心得体会以及合理化建议和改进措施。

§ 1-3 安全操作注意事项

为了按时顺利地完拖自动控制系统实验，确保实验时人身与设备安全，要严格遵守实验室的安全操作规程，并注意以下事项：

- (1) 人体不可接触带电线路。
- (2) 电源必须经过开关(或接触器)、熔断器之后接入设备、系统。接线或拆线都必须在切断电源(即拉开电源开关)情况下进行。
- (3) 学生完成接线允许合闸时，须招呼全组同学引起注意后方可合上电源，实验中如发生事故，应立即切断电源开关，并保持线路原状和故障现场，报告和协同教师查清问题、妥善处理故障后才能继续进行实验。
- (4) 实验时应注意衣服、围巾、发辫及实验接线用的导线等不得卷入电机的旋转部分，不得用手或脚去促使电机起动或停转，以免发生危险。
- (5) 操作开关时应迅速果断、快合、快断，以免产生电弧烧坏触刀，合闸时应使触刀投入静插座，保持接触良好。
- (6) 使用电流互感器时，二次侧不得开路，以免感应产生高压，损坏仪器和危及人身安全，对具有很多匝数线圈的电路，要小心断路时产生高压而引起的危险，高压电容器断电后须拆动接线时，应先进行放电，以免高压伤人。
- (7) 电动机励磁电源可直接接通，尽量不用中间刀开关，以防止失磁飞车。
- (8) 在电压、电流、转速闭环前一定要确保反馈极性正确，以组成负反馈运行。
- (9) 除作阶跃起动试验外，系统起动前负载电阻必须放在最大值，给定电位器必须退回至零位后，才允许合闸起动，并慢慢增加给定，以免元件和设备过载损坏。
- (10) 在实验过程中，若突然发现电网停止供电，须立即切断实验地点的全部电源开关。若实验中接线偶然脱落，也须很快切断电源，并只准在切断电源后才可以把导线接回原处。
- (11) 实验室总电源由实验室工作人员负责操作，其他人员不得乱动。

第二章 直流调速系统实验

§ 2-1 晶闸管—电动机系统参数和环节特性的测定

一、实验目的

- (1) 了解晶闸管—电动机系统的组成及其基本结构。
- (2) 掌握晶闸管—电动机系统参数测定的方法。
- (3) 了解晶闸管—电动机系统中某些环节的非线性现象, 测定整流装置及测速发电机的特性。

二、系统组成和工作原理

晶闸管—电动机系统主要由整流变压器 ZLB、晶闸管整流调速装置、平波电抗器 L 和电动机—发电机组组成。

交流电源经三相整流变压器后送入晶闸管整流调速装置, 整流装置的主电路可根据实验需要接成单相桥式、三相零式或三相桥式电路, 控制电路可灵活组合成单环或多环系统。在测定系统参数和环节特性时, 控制回路可直接由给定电压作为触发器的移相控制电压, 改变给定电压的大小即可改变控制角 α , 从而获得可调的直流电压和转速, 以满足实验要求。

若主回路按常用的三相桥式电路连接, 则测试参数时系统的组成如图 2-1 所示。

三、仪器设备

(1) 直流电动机—发电机组	1 套
(2) 三相整流变压器	1 台
(3) 平波电抗器	1 台
(4) KZS-1 型晶闸管直流调速实验装置	1 台
(5) 直流电压表或数字式电压表	1 只
(6) 直流电流表	2 只
(7) 变阻器	2 只
(8) 光线示波器	1 台

四、实验要求

1. 测量并计算晶闸管—电动机系统中的下列参数

- (1) 直流电动机电枢电阻 R_a 。
- (2) 平波电抗器线圈电阻 R_L 。
- (3) 晶闸管整流装置内阻 R_s 。
- (4) 晶闸管—电动机系统主电路总电阻 R 。
- (5) 晶闸管—电动机系统主电路总电感 L 。
- (6) 晶闸管—电动机系统主电路电磁时间常数 T_L 。
- (7) 直流电动机电势常数 C_e 。

磁时间常数 T_l 与机电时间常数 T_m ，这些参数均需通过实验手段来测定，具体方法如下：

1. 电枢回路电阻的测量

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 和整流装置的电源内阻 R_s 。即：

$$R = R_a + R_L + R_s \quad (2-1)$$

测定元件的电阻值时，由于其阻值较小，若利用欧姆表或电桥测量，因是小电流检测，接触电阻影响很大，故可以利用直流伏安法，但要测出晶闸管整流装置的电源内阻就须测量整流装置的理想空载电压 U_{s0} ，这对晶闸管整流电源是无法测量的，为此应用伏安比较法。伏安比较法的实验线路如图 2-2 所示。

在被测系统的主回路中，串入变阻器 R_{b1} 和 R_{b2} ，测试时电机不加励磁，使电机堵转，合上开关 K_1 、 K_2 和 K_3 ，调整给定电位器 R_w ，使整流装置输出电压 $U_a = 30 \sim 70\% U_{ad}$ （读取电压表 1 V 的读数），然后调整变阻器 R_{b2} 使电枢电流约为 $80 \sim 90\% I_{ad}$ （如有机械堵转设备，则电枢电流可取上限，若无机堵转设备，则所加电枢电流以电动机不转为限），读取电压表 2 V 及电流表 A 的数值各为 U_1 和 I_1 ，此时整流装置的理想空载电压为：

$$U_{s0} = I_1 R + U_1 \quad (2-2)$$

为取得较大的电流差值，调整 R_{b1} 使与 R_{b2} 之值近似相等，然后拉开开关 K_3 ，把 R_{b1} 接入回路，在理想空载电压近似不变的前提下，读取 2 V 及 A 的数值为 U_2 和 I_2 。即：

$$U_{s0} = I_2 R + U_2 \quad (2-3)$$

解式 (2-2) 和 (2-3)，消去 U_{s0} ，即得电枢回路总电阻

$$R = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2} \quad (2-4)$$

若把电机电枢两端用导线短接，然后重复上述实验，可求得：

$$R_L + R_s = \frac{U'_2 - U'_1}{I'_1 - I'_2} \quad (2-5)$$

由此得出电机的电枢电阻 $R_a = R - (R_L + R_s)$

同样若仅短接电抗器两端，则可测得电抗器的直流电阻 R_L 。

若把电机与电抗器同时短接，则可测得晶闸管整流装置的电源内阻 R_s 。

为减小由于非线性和接触电阻等原因造成的误差，可以改变整流装置输出电压 U_a ，重复上述参数测量，然后取平均值。

2. 电枢回路电感的测定

电枢回路的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 ，因 L_b 之值较小，若略去不计，则电枢回路的等效总电感为：

$$L = L_a + L_L \quad (2-6)$$

电感的数值可用交流伏安法测定，为了接近实际使用情况，电机须加额定励磁，但处于堵转状态，实验线路如图 2-3 所示。

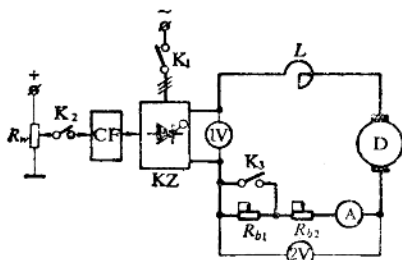


图2-2 伏安比较法实验线路图

实验时交流电压的有效值应小于电机直流电压的额定值。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_s 和 U_L 以及电流 I ，由此得到交流阻抗 Z 和 Z_L ，计算出电感值 L 和 L_L 。

$$Z_s = \frac{U_s}{I} \quad (2-7)$$

$$Z_L = \frac{U_L}{I} \quad (2-8)$$

$$L_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} / (2\pi f) \quad (2-9)$$

$$L_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2} / (2\pi f) \quad (2-10)$$

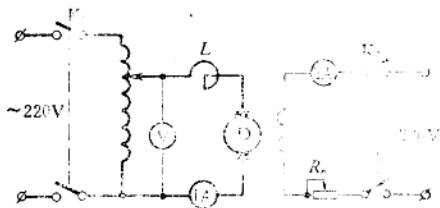


图2-3 测定电感的实验线路图

3. 电枢回路电磁时间常数 T_i 和电动机

电枢电磁时间常数 T_i 的测定

单独测定电磁时间常数的方法常用的有以下二种：

(1) 根据实测的回路电阻和电感计算电磁时间常数

$$\text{电动机电枢电磁时间常数} \quad T_e = \frac{L_s}{R_s} \quad (2-11)$$

$$\text{电枢回路电磁时间常数} \quad T_i \approx \frac{L}{R} = \frac{L_s + L_L}{R_s + R_L + R_N} \quad (2-12)$$

(2) 用电流波形法测定电枢回路的电磁时间常数 T_i

当电枢回路突加给定电压时，由于回路中存在电感，电流不能突变，而是按指数规律上升。

$$i = I_d (1 - e^{-\frac{t}{T_i}}) \quad (2-13)$$

电流变化曲线如图 2-4 所示。

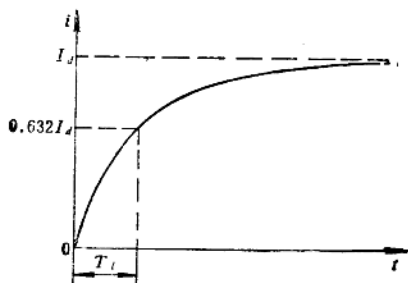


图2-4 电流变化曲线

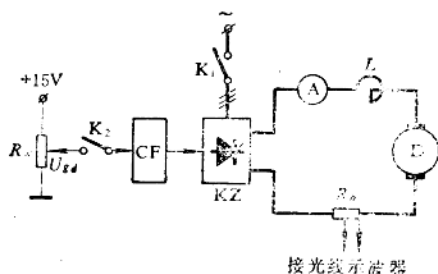


图2-5 用电流波形法测定 T_i 的实验线路图

当 $t = T_i$ 时，则 $i = I_d (1 - e^{-1}) = 0.632 I_d$ 。

由此可利用图 2-5 实验线路在电机不加励磁的情况下（若有条件人为了使电机堵转，则尽可能加励磁，以便更符合实际情况），先通过给定电位器 R_s 调整电枢电流为 $50 \sim 90 I_{d1}$ ，然后保持 U_{sd} 不变，利用开关 K_2 突加给定电压，用光线示波器拍摄 $i_d = f(t)$ 的波形（或用长余辉示波器点绘波形），由波形图上测量出当电流上升到 63.2% 稳定值时的时间，即为电枢回路的电磁时间常数 T_i ，再根据式 (2-12) 在已知 R 数值时，可计算出电枢回路总电感 L 。

4. 电动机—发电机组飞轮惯量 GD^2 和机电时间常数 T_m 的测定（实验时可在以下方法

中任选一种)

(1) 通过 GD^2 等参数的测定计算 T_n , 根据电力拖动系统运动的数值方程式

$$M - M_{fz} = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (2-14)$$

式中 M ——电动机的电磁转矩, 单位为 $N \cdot m$;

M_{fz} ——负载转矩(空载时即空载转矩 M_K), 单位为 $N \cdot m$;

n ——电机转速, 单位为 r/min 。

电机空载自由停车时, $M = 0$, $M_{fz} = M_K$, 其数值方程式为:

$$M_K = -\frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}$$

$$GD^2 = \frac{375 M_K}{\left| \frac{dn}{dt} \right|} \quad (2-15)$$

式中 M_K 的单位为 $N \cdot m$, GD^2 的单位为 $N \cdot m^2$ 。

因此通过 M_K 及 $\frac{dn}{dt}$ 的检测就可求得 GD^2 。

机组的空载转矩 M_K 可由测定机组在不同转速 n 下的电枢电压 U_a 与电流值 I_K , 并通过计算空载功耗 P_K (单位为 kW) 而求得。

$$P_K = (U_a I_K - I_K^2 R_a) \times 10^{-3} \quad (2-16)$$

数值方程式为:

$$M_K = \frac{9550 P_K}{n} \quad (2-17)$$

实验线路如图 2-6 所示, 测试时电机须加额定磁场。

$\frac{dn}{dt}$ 值可由自由停车时

所得的曲线 $n = f(t)$ 求得,

按图 2-6 线路空载起动到稳态转速后, 切断给定电压

U_{gd} , 通过长余辉示波器可描绘出 $n = f(t)$ 的曲线。测试时先调整长余辉示波器的

扫描时间使与 n 下降时间相配合, 再用秒表读出转速由

稳态值下降到零的时间, 由于空载转矩 M_K 不能保持常

数, 故此曲线并不是一根直线, 可以转速 n 为基准选择若干个点, 求出相应于某一转速时的

M_K 及 $\frac{dn}{dt}$ 值, 以求得 GD^2 的平均值。

为了避免由于电枢电阻测量误差的影响, 可利用测定空载损耗时的数据, 对应上面所选

的转速区段, 求得电机的电势常数 C_e (当磁通为额定值时):

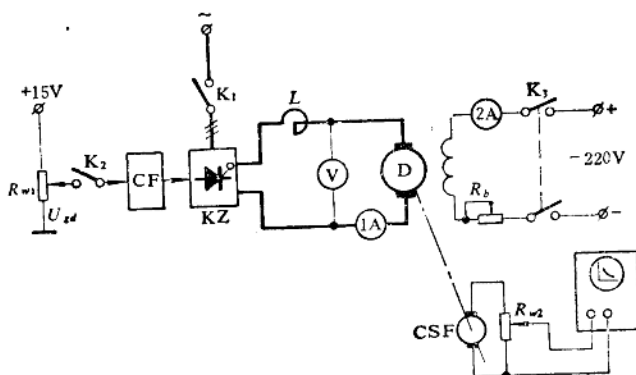


图2-6 测定 GD^2 等参数的实验线路图

数, 故此曲线并不是一根直线, 可以转速 n 为基准选择若干个点, 求出相应于某一转速时的

M_K 及 $\frac{dn}{dt}$ 值, 以求得 GD^2 的平均值。

为了避免由于电枢电阻测量误差的影响, 可利用测定空载损耗时的数据, 对应上面所选的转速区段, 求得电机的电势常数 C_e (当磁通为额定值时):

$$C_e = K_e \Phi = \frac{U_{d2} - U_{d1}}{n_2 - n_1} \quad (2-18)$$

式中 C_e 的单位为 $V/[r \cdot (\min)^{-1}]$, K_e 为电机的结构常数分别取几点, 求取 C_e 的平均值。

转矩常数(磁通为额定值时) $C_M = 9.55 C_e$,

式中 C_M 的单位为 $N \cdot m/A$ 。

由此可计算电力拖动系统的机电时间常数 T_m

$$T_m = \frac{GD^2 \cdot R}{375 C_e C_M} \quad (2-19)$$

式中 T_m 的单位为 s 。

(2) 用转速上升曲线求拖动系统的机电时间常数 T_m 。因拖动系统的机电时间常数 $T_m \gg T_l$, 所以可近似地把系统看成是一阶惯性环节。即:

$$n = \frac{K}{1 + T_m s} U_d \quad (2-20)$$

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

测试时电枢回路中附加电阻应全部切除, 使 T_l 更符合实际值, 突加给定电压时的起动电流应小于允许的最大起动电流 λI_{d0} (由于起动电流不同时, n 的上升规律有所变化, 为使求得的 T_m 值更符合实际, 突加给定电压时的起动电流尽量接近实际运行时的起动电流), 可用长余辉示波器描绘 $n = f(t)$ 的曲线(或用光线示波器拍摄过渡过程曲线)。

(3) 用电机转速过渡过程的波形面积求拖动系统的机电时间常数 T_m 。直流电动机在电流连续时电压和转速间的传递函数为:

$$W_b(s) = \frac{n(s)}{U_{d0}(s)} = \frac{1/C_e}{T_m T_l s^2 + T_m s + 1} \quad (2-21)$$

$$\text{所以} \quad n = \frac{U_{d0}}{C_e} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (2-22)$$

由 $t = 0$ 时, $n = 0$ 和 $\frac{dn}{dt} = 0$, 求 A_1 和 A_2

$$t = 0, \quad n = 0, \quad \text{则} \quad A_1 + A_2 = -\frac{U_{d0}}{C_e}$$

$$t = 0, \quad \frac{dn}{dt} = 0, \quad \text{则} \quad A_1 p_1 + A_2 p_2 = 0$$

$$\text{由此得出:} \quad A_1 = \frac{U_{d0}}{C_e} \cdot \frac{p_2}{p_1 - p_2} \quad (2-23)$$

$$A_2 = -\frac{U_{d0}}{C_e} \cdot \frac{p_1}{p_1 - p_2} \quad (2-24)$$

$$\text{所以} \quad n = \frac{U_{d0}}{C_e} \left(1 + \frac{p_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - \frac{p_1}{p_1 - p_2} e^{p_2 t} \right) \quad (2-25)$$

$$\int_0^\infty \left(\frac{U_{d0}}{C_e} - n \right) dt = -\frac{U_{d0}}{C_e} \int_0^\infty \left(\frac{p_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - \frac{p_1}{p_1 - p_2} e^{p_2 t} \right) dt$$

因为 p_1 、 p_2 为负实数或负实部的虚数