

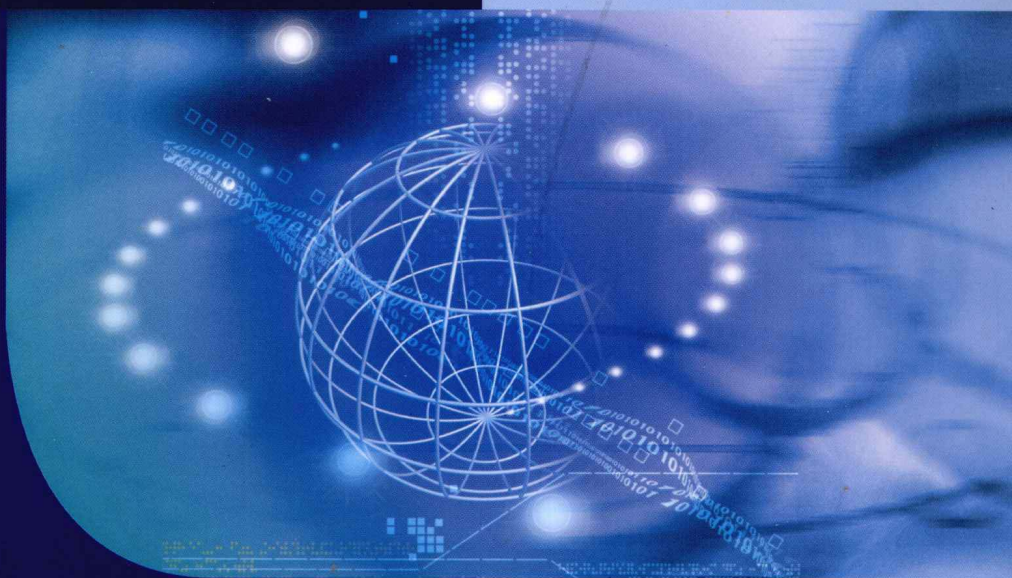


普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

电机及电气 控制实践

◎ 丁守成 主编

DIANJI JI DIANQI KONGZHI SHIJIAN



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材

电机及电气控制实践

主 编 丁守成

副主编 李文辉 杨世洲

参 编 黄 瑞 李建海 汪哲民 周红莉



机 械 工 业 出 版 社

本书是从 21 世纪我国人才培养的要求出发,结合多年教学改革与实践的经验和成果编写的,是一本集应用性、综合性为一体的实践教材。全书分 4 章。第 1 章是电机与拖动实验,包括直流电机实验、变压器实验、异步电动机实验、同步电机实验、电动机机械特性的研究;第 2 章是电气控制及应用,包括常用电气控制电路、典型机床的电气控制、电气控制技能训练、PLC 的应用(基于 FX 系列 PLC);第 3 章是基于 MATLAB 的电机特性仿真;第 4 章是电机故障的诊断与修理,包括交流电机的拆装与检修、直流电机的拆装与检修、1000kV·A 以下变压器的维护与检修;附录中安排了电气系统技能测试题,以及给出了部分实验设备的技术参数和使用方法。

本书可作为高等院校工科非电类本科专业、电气工程及其自动化专业和自动化专业的教材,也可作为高等职业技术学校相关工科专业的实践教学用书,对于相关工程技术人员也是一本实用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电机及电气控制实践/丁守成主编. —北京:机械工业出版社,2012.4
普通高等教育“十二五”电气信息类规划教材
ISBN 978-7-111-37774-0

I. ①电… II. ①丁… III. ①电机学-高等学校-教材②电气控制-高等学校-教材 IV. ①TM3②TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 048525 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:闫晓宇 责任编辑:闫晓宇 责任校对:张媛
封面设计:张静 责任印制:杨曦
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2012 年 4 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm · 12.25 印张·6 插页·320 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-37774-0
定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

封面无防伪标均为盗版

读者购书热线:(010)88379203

前 言

随着社会、经济和科技的发展,以及人类认识和实践领域的扩大和加深,知识的重新组织和分配势在必行,学生需要学习和了解的知识明显增加。为适应 21 世纪我国人才培养的总体要求,本书在分析当前教学的现状和社会需要的基础上,贯彻创新教育和素质教育的精神,确定了以保证基础知识、加强工程应用实践、更新内容体系作为本书编写的基本依据和主要特点。

本书是高等院校工科专业电机及电气控制技术类课程的实践性教材,以技能训练为主线精心编写而成,目的在于提高学生的实际动手能力,培养学生的创新能力,帮助学生掌握理论指导下的实验方法,锻炼学生的实际操作能力,熟悉常规电机的正确使用方法,掌握电气控制电路的设计与实践,使学生学会利用理论和计算机对测得的实验数据进行合理分析,作出正确结论,并在此基础上进行分析研究。

本书是编者在以往编写的电机与拖动实验、电气系统综合训练、维修电工培训教程等讲义的基础上,参考了大量的文献资料,吸取各家之长,不断充实、修改、凝练讲义中的内容,而重新加以编写的。本书涉及电机与拖动实验、电气控制及应用、电气系统故障诊断及修理三个方面,内容既有基本理论的验证,又有综合实践训练的提高,既有科研实践能力的培养,又有维修电工职业技能基础的教育,同时还强化了工程应用能力的培养,注重培养学生的自学能力和创新精神。

本书主要内容如下:直流发电机实验,直流电动机实验,变压器基本实验、变压器并联运行实验,单相异步电动机实验、三相异步电动机实验,同步发电机实验、同步电动机实验、同步发电机并网运行研究,发电机-电动机机组特性研究,常用电气控制电路、典型机床的电气控制、电气控制技能训练、PLC 的应用(基于 FX 系列 PLC),基于 MATLAB 的电机特性仿真,电气系统检修技术,1000kV·A 以下变压器的维护与检修等内容。附录主要包括电气系统技能测试题、MEL 系列电机系统教学实验台使用说明和部分实验的实验报告等内容。

本书力图通过基础实验使学生掌握基本实验技能,通过技能训练提高学生的工程实践能力,通过设计性综合训练培养学生的创新能力和计算机应用能力。本书可作为高等院校学生电机与拖动基础实验、电气控制综合训练、电气系统检修技术和相关应用软件的学习教材,也可作为课程设计、毕业设计的参考书,还可作为电气工程技术人员的参考资料。

本书由丁守成任主编,李文辉、杨世洲任副主编。第 1 章、附录 A、附录 C 由丁守成编写,第 2 章、附录 B 由李文辉编写,第 3 章由李建海编写,第 4 章由杨世洲编写,全书由丁守成负责统稿,李文辉负责本书的校阅工作。此外,黄瑞、周红莉、汪哲民完成了第 1 章、第 2 章和第 4 章的测试工作,李建海完成了第 3 章的仿真实验工作。

本书经兰州交通大学祁文哲教授主审,祁教授不辞劳苦认真地审阅了全书,提出了不少

IV

宝贵的意见和建议，在此谨致以诚挚的谢意。

由于编者水平有限，书中不妥和错误之处在所难免，殷切希望使用本教材的同仁、学生和其他读者给予批评指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 电机与拖动实验 1

1.1 直流电机实验	2
1.1.1 电机认识	2
1.1.2 直流发电机	4
1.1.3 他励直流电动机	8
1.1.4 串励直流电动机	11
1.2 变压器实验	13
1.2.1 单相变压器	13
1.2.2 三相变压器	15
1.2.3 三相变压器的联结组和不对称 短路	20
1.2.4 三相变压器的并联运行	24
1.3 异步电动机实验	26
1.3.1 三相异步电动机的参数测定	26
1.3.2 三相异步电动机的起动与调速	30
1.3.3 单相电容起动异步电动机	32
1.4 同步电机实验	34
1.4.1 三相同步发电机的运行特性	34
1.4.2 三相同步发电机的并网运行	38
1.4.3 三相同步电动机	42
1.5 电动机机械特性的研究	45
1.5.1 他励直流电动机机械特性的 研究	45
1.5.2 三相异步电动机在各种运行 状态下的机械特性研究	48
1.5.3 三相绕线转子异步电动机的 $T-s$ 曲线测绘	51

第 2 章 电气控制及应用 54

2.1 常用电气控制电路	54
2.1.1 电器基础知识	54
2.1.2 三相异步电动机的直接起动 控制	61
2.1.3 常用继电器接触控制电路	62

2.1.4 三相异步电动机的正反转控制	63
2.1.5 三相异步电动机的星-三角减压 起动控制	64
2.1.6 三相笼型异步电动机的制动 控制	65
2.1.7 三相异步电动机的继电器接触 控制电路设计	66
2.2 典型机床的电气控制	67
2.2.1 常用机床和电动葫芦的电气 控制	67
2.2.2 C6150 车床的电气控制	68
2.2.3 Z3040 摇臂钻床的电气控制	70
2.2.4 M7130 卧轴矩台平面磨床的 电气控制	74
2.2.5 X62W 卧式万能铣床的电气 控制	76
2.3 电气控制技能训练	79
2.3.1 机床电气控制电路图和接线 图的绘制	79
2.3.2 机床电气设备的安装与配线	80
2.3.3 机床电气控制电路的安装	83
2.3.4 机床电气设备的调整试车	83
2.3.5 机床电气设备故障的排除 方法	84
2.3.6 电气控制技能训练的任务及 要求	85
2.4 PLC 的应用	87
2.4.1 FX 系列 PLC 简介	87
2.4.2 FX 系列 PLC 的基本指令	91
2.4.3 FX 系列 PLC 的编程语言	94
2.4.4 PLC 控制小车自动往返运动	95
2.4.5 PLC 交通灯控制	95
2.4.6 PLC 数码显示控制	96
2.4.7 PLC 温度、液位控制	99
2.4.8 PLC 三相步进电动机控制	101

2.4.9 PLC 三相异步电动机正反转和星-三角减压启动的设计与调试	103
2.4.10 PLC 抢答器的设计与调试	103
2.4.11 PLC 自动感应门控制系统的设计与调试	104
第3章 基于 MATLAB 的电机特性仿真	106
3.1 MATLAB 简介	106
3.2 MATLAB 应用实例	113
3.2.1 直流电动机的机械特性	113
3.2.2 直流电动机的转矩特性	115
3.2.3 三相异步电动机的机械特性	116
第4章 电机故障的诊断与修理	119
4.1 交流电机的拆装与检修	119
4.1.1 三相异步电动机的拆卸和装配	119
4.1.2 三相异步电动机定子绕组的拆除、绕制、接线及浸漆烘干	121
4.1.3 三相异步电动机定子绕组首尾端的判别	129
4.1.4 三相异步电动机常见故障的判断、检修及检修后的一般性试验	130
4.1.5 三相异步电动机维修相关的步骤及方法	132
4.1.6 多速异步电动机的检修	135
4.1.7 同步电机的检修	135
4.2 直流电机的拆装与检修	137
4.2.1 直流电机的拆卸和装配	137
4.2.2 直流电机绕组的检修	137
4.2.3 直流电机换向器的检修	141
4.2.4 直流电机电刷的更换	142
4.2.5 直流电机修复后的检查与试验	143
4.2.6 直流电机的常见故障及处理方法	145
4.3 1000kVA 以下变压器的维护与检修	146
附录	150
附录 A 电气系统技能测试题	150
附录 B MEL 系列电机系统教学实验台使用说明	183
参考文献	189
部分实验的实验报告	

第1章 电机与拖动实验

电机与拖动实验的目的在于培养学生基本的实验方法与操作技能。

1. 实验前准备

实验前应复习教科书有关章节，了解实验的目的、项目、方法及步骤，明确实验过程中的注意事项（有些内容可到实验室对照实验预习）。认真作好实验前的准备工作，对于培养同学独立工作能力，提高实验质量和保护实验设备都是很重要的。

2. 实验进行

1) 建立小组，合理分工。每次实验都以小组为单位进行，对于实验进行中的接线、调节负载、保持电压或电流、记录数据等工作，每人应有明确的分工，以保证实验操作协调，记录数据准确可靠。

2) 选择组件和仪表。实验前应先熟悉该次实验所用的组件，记录电机铭牌和选择仪表量程，然后依次排列组件和仪表，便于测取数据。

3) 按图接线。根据实验电路及所选组件、仪表，按图接线，线路力求简单明了。接线原则是，先接串联主回路，再接并联支路。为查找线路方便，每路可用相同颜色的导线或插头。

4) 起动电机，观察仪表。正式实验开始之前，应先熟悉仪表，然后按规范起动电机，并观察仪表是否正常。如果出现异常，应立即切断电源，并排除故障；如果一切正常，即可正式开始实验。

5) 测取数据。预习时对电机的试验方法及所测数据的大小要做到心中有数。正式实验时，应根据实验步骤逐次测取数据。

6) 认真负责，实验有始有终。实验完毕，需将数据交指导教师审阅。经指导教师认可后，方允许拆线。实验所用的组件、导线及仪器等物品应整理好。

3. 实验报告

实验报告是根据实测数据和在实验中观察和发现的问题，经过自己分析研究或分析讨论后写出的心得体会。实验报告要简明扼要、字迹清楚、图表整洁、结论明确。实验报告要求如下：

1) 实验名称，专业、班级、学号、姓名，实验日期、室温 $^{\circ}\text{C}$ 。

2) 列出实验中所用组件的名称及编号、电机铭牌数据（ P_N 、 U_N 、 I_N 、 n_N ）等。

3) 列出实验项目并绘出实验时所用的电路图，并注明仪表量程、电阻器阻值等。

4) 数据的整理和计算，将记录及计算的数据用坐标纸画出曲线，所绘坐标图尺寸不小于 $8\text{cm} \times 8\text{cm}$ ，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。根据数据和曲线进行计算和分析，说明实验结果与理论是否符合，可对某些问题提出一些自己的见解并最后写出结论。

5) 每次实验每人应独立完成一份报告，按时送交指导教师批阅。

4. 实验安全操作规程

学生实验时，要严格遵守如下安全操作规程：

- 1) 实验时，人体不可接触带电线路，接线或拆线都必须在切断电源的情况下进行。
- 2) 学生独立完成接线或改接线路后必须经指导教师检查和允许，并明确提示组内同学，引起注意，之后方可接通电源。实验中如发生事故，应立即切断电源，经查清问题和妥善处理故障后，才能继续实验。
- 3) 起动电机前，应先检查功率表及电流表的量程是否符合要求，以免损坏仪表或电源。

1.1 直流电机实验

1.1.1 电机认识

1. 实验目的

- 1) 学习电机实验的基本要求与安全操作注意事项。
- 2) 认识在直流电机实验中所用的电机、仪表、变阻器等组件及使用方法。
- 3) 熟悉他励直流电动机（即并励直流电动机按他励方式）的接线、起动、改变电机旋转方向与调速的方法。

2. 实验项目

- 1) 了解 MEL 系列电机系统教学实验台中的直流稳压电源、涡流测功机、变阻器、多量程直流电压表、安培表、毫安表及直流电动机的使用方法。
- 2) 用伏安法测直流电动机和直流发电机的电枢绕组的冷态电阻。
- 3) 他励直流电动机的起动、调速及改变转向。

3. 实验设备及仪器

MEL 系列电机系统教学实验台主控制屏；电机导轨及测功机、转速转矩测量（MEL—13）或电机导轨及校正直流发电机；并励直流电动机；220V 直流可调稳压电源；电机起动箱（MEL—09）。

4. 实验方法及步骤

(1) 用伏安法测电枢绕组的直流电阻 实验电路如图 1-1 所示。图中， U 为可调直流稳压电源； R 为 3000Ω 磁场调节电阻（MEL—09）； V 为直流电压表（MEL—06）； A 为直流安培表（MEL—06）； M 为直流电机电枢。

1) 经检查接线无误后，逆时针调节磁场调节电阻 R 使至最大。直流电压表量程选为 300V 挡，直流安培表量程选为 2A 挡。

2) 按顺序按下主控制屏绿色“闭合”按钮，可调直流稳压电源的电源控制船形开关以及复位按钮，建立直流电源，并调节直流电源至 220V 输出。

调节 R 使电枢电流达到 0.2A（如果电流太大，可能由于剩磁的作用使电机旋转，测量无法进行，如果电流太小，可能由于接触电阻产生较大的误差），迅速测取电机电枢两端电压 U_M 和电流 I_a 。将电机转子分别旋转 1/3 和 2/3 周，同样测取 U_M 、 I_a ，记录数据于表 1-1

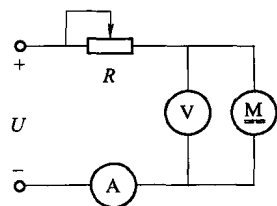


图 1-1 测电枢绕组的直流电阻实验电路

中。

3) 增大 R (逆时针旋转) 使电流分别达到 0.15A 和 0.1A, 用上述方法测取 6 组数据, 记录于表 1-1 中。取三次测量的平均值作为实际冷态电阻值。

表 1-1 实验数据 室温 _____ °C

序号	U_M/V	I_a/A	R/Ω		R_a 平均/ Ω	R_{aref}/Ω
1			R_{a11}	R_{a1}		
			R_{a12}			
			R_{a13}			
2			R_{a21}	R_{a2}		
			R_{a22}			
			R_{a23}			
3			R_{a31}	R_{a3}		
			R_{a32}			
			R_{a33}			

注: 表中, $R_{a1} = (R_{a11} + R_{a12} + R_{a13})/3, R_{a2} = (R_{a21} + R_{a22} + R_{a23})/3, R_{a3} = (R_{a31} + R_{a32} + R_{a33})/3$ 。

(2) 计算基准工作温度时的电枢电阻 由实验测得电枢绕组电阻值, 此值为实际冷态电阻值, 冷态温度为室温。按下式换算到基准工作温度时的电枢绕组电阻值:

$$R_{aref} = R_a = \frac{235 + \theta_{ref}}{235 + \theta_a}$$

式中, R_{aref} 为换算到基准工作温度时电枢绕组电阻 (Ω); R_a 为电枢绕组的实际冷态电阻 (Ω); θ_{ref} 为基准工作温度, 对于 E 级绝缘为 75℃; θ_a 为实际冷态时电枢绕组的温度 (℃)。

(3) 直流仪表、转速表和变阻器的选择 直流仪表、转速表量程根据电机的额定值和实验中可能达到的最大值来选择, 变阻器根据实验要求来选用, 并按电流的大小选择串联、并联或串并联的接法。

1) 电压量程的选择。如测量电动机两端为 220V 的直流电压, 选用直流电压表为 300V 量程挡。

2) 电流量程的选择。因为并励直流电动机的额定电流为 1.1A, 测量电枢电流的电表可选用 2A 量程挡, 额定励磁电流小于 0.16A, 测量励磁电流的毫安表选用 200mA 量程挡。

3) 转速表选择。电机额定转速为 1600r/min, 若采用指针表和测速发电机, 则选用 1800r/min 量程挡。若采用光电编码器, 则不需要量程选择。

4) 变阻器的选择。变阻器的选用原则是根据实验中所需的阻值和流过变阻器最大的电流来确定。电枢回路调节电阻选用 MEL—09 组件的 100 Ω /1.22A 电阻, 磁场回路调节选用 MEL—09 组件的 3000 Ω /200mA 可调电阻。

(4) 直流电动机的起动 R_1 : 电枢调节电阻 (MEL—09); R_f : 磁场调节电阻 (MEL—09); M: 并励直流电动机 M03; G: 涡流测功机; I_s : 电流源, 位于 MEL—13, 由“转矩设定”电位器进行调节。实验开始时, 将 MEL—13 “转速控制”和“转矩控制”选择开关扳向“转矩控制”, “转矩设定”电位器逆时针旋转到底; U_1 : 可调直流稳压电源; U_2 : 直流电机励磁电源; V_1 : 可调直流稳压电源自带电压表; V_2 : 直流电压表, 量程为 300V 挡, 位于 MEL—06; A: 电枢电流测量表; mA: 励磁电流测量表。

1) 实验电路如图 1-2 所示, 检查 M、G 之间是否用联轴器连接好, 电机导轨和 MEL—13 的连接线是否接好, 电动机励磁回路接线是否牢靠, 仪表的量程、极性是否正确选择。

2) 将电机电枢调节电阻 R_1 调至最大, 磁场调节电阻调至最小, “转矩设定” 电位器 (位于 MEL—13) 逆时针调到底。

3) 开启主控制屏的“总电源”控制钥匙开关至“开”位置, 按次序按下绿色“闭合”按钮, 打开励磁电源和可调直流电源的“电源控制船形开关”, 按下“复位”按钮。此时, 直流电源的绿色工作发光二极管亮, 指示直流电压已建立。旋转“电压调节”电位器, 使可调直流稳压电源输出 220V 电压。

(5) 调节他励直流电动机的转速

1) 分别改变串入电动机 M 电枢回路的调节电阻 R_1 和励磁回路的调节电阻 R_f 。

2) 调节“转矩设定”电位器, 注意转矩不要超过 $1.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

以上两种情况可分别观察转速变化情况。

(6) 改变电动机的转向 将电枢回路调节电阻 R_1 调至最大值, “转矩设定”电位器逆时针调到底, 先断开可调直流电源的船形开关, 再断开励磁电源的船形开关, 使他励直流电动机停机, 将电枢或励磁回路的两端接线对调后, 再按前述起动电动机, 观察电动机的转向及转速表的读数。

5. 注意事项

1) 他励直流电动机起动时, 需将励磁回路串联的电阻 R_f 调到最小, 先接通励磁电源, 使励磁电流最大, 同时必须将电枢串联起动电阻 R_1 调至最大, 然后方可接通电源, 使电动机正常起动, 起动后, 将起动电阻 R_1 调至最小, 使电动机正常工作。

2) 他励直流电动机停机时, 必须先切断电枢电源, 然后断开励磁电源。同时, 必须将电枢串联电阻 R_1 调到最大值, 励磁回路串联的电阻 R_f 调到最小值, 给下次起动做好准备。

6. 实验报告

1) 画出并励直流电动机电枢串电阻起动的电路图。说明电动机起动时, 起动电阻 R_1 和磁场调节电阻 R_f 应调到什么位置? 为什么?

2) 增大电枢回路的调节电阻, 电动机的转速如何变化? 增大励磁回路的调节电阻, 转速又如何变化?

3) 用什么方法可以改变直流电动机的转向?

4) 为什么要求并励直流电动机磁场回路的接线要牢靠?

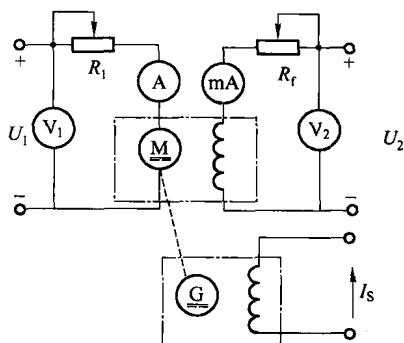


图 1-2 他励直流电动机实验电路

1.1.2 直流发电机

1. 实验目的

1) 掌握用实验方法测定直流发电机的运行特性, 并根据所测得的运行特性评定该被测试发电机的有关性能。

2) 通过实验观察并励直流发电机的自励过程和自励条件。

2. 实验项目

(1) 他励直流发电机

1) 空载特性。保持 $n = n_N$ ，使 $I = 0$ ，测取 $U_0 = f(I_f)$ 。

2) 外特性。保持 $n = n_N$ ，使 $I_f = I_{fN}$ ，测取 $U = f(I)$ 。

3) 调节特性。保持 $n = n_N$ ，使 $U = U_N$ ，测取 $I_f = f(I)$ 。

(2) 并励直流发电机

1) 观察自励过程。

2) 测外特性。保持 $n = n_N$ ，使 $R_L = \text{常数}$ ，测取 $U = f(I)$ 。

(3) 复励直流发电机 保持 $n = n_N$ ，使 $R_f = \text{常数}$ ，测取 $U = f(I)$ 。

3. 实验设备及仪器

MEL 系列电机教学实验台主控制屏；电机导轨及测功机，转矩转速测量组件（MEL—13）或电机导轨及转速表；并励直流电动机 M03；复励直流发电机 M01；直流稳压电源（位于主控制屏下部）；直流电压表、毫安表、安培表（MEL—06）；波形测试及开关板（MEL—05）；三相可调电阻 900Ω （MEL—03）；三相可调电阻 90Ω （MEL—04）；电机起动箱（MEL—09）。

4. 实验方法及步骤

(1) 他励直流发电机 实验电路如图 1-3 所示。图中，G：直流发电机 M01， $P_N = 100\text{W}$ ， $U_N = 200\text{V}$ ， $I_N = 0.5\text{A}$ ， $n_N = 1600\text{r/min}$ ；M：直流电动机 M03，按他励接法； S_1 、 S_2 ：双刀双掷开关，位于 MEL—05； R_1 ：电枢调节电阻 $100\Omega/1.22\text{A}$ ，位于 MEL—09； R_f ：磁场调节电阻 $3000\Omega/200\text{mA}$ ，位于 MEL—09； R_2 ：磁场调节电阻，采用 MEL—03 最上端 900Ω 变阻器，并采用分压器接法； R_L ：发电机负载电阻，采用 MEL—03 中间端和下端变阻器，采用串并联接法，阻值为 2250Ω （ 900Ω 与 900Ω 串联的阻值再加上 900Ω 与 900Ω 并联的阻值）。

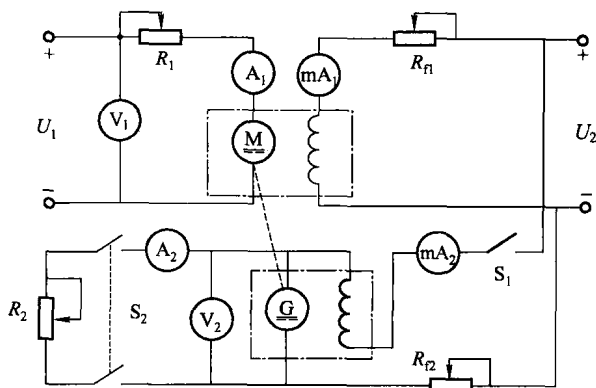


图 1-3 他励直流发电机实验电路

调节时先调节串联部分，当负载电流大于 0.4A 时用并联部分，将串联部分阻值调到最小并用导线短接以避免烧毁熔断器； mA_1 、 A_1 ：分别为励磁电流测量表和电枢电流测量表，位于直流电源上； U_1 、 U_2 ：分别为可调直流稳压电源电压和电机励磁电源电压； V_2 、 mA_2 、 A_2 ：分别为直流电压表（量程为 300V 挡），直流毫安表（量程为 200mA 挡），直流安培表（量程为 2A 挡）。

1) 空载特性。断开发电机负载开关 S_2 ，合上励磁电源开关 S_1 ，接通直流发电机励磁电源，调节 R_2 ，使直流发电机励磁电压最小， mA_2 读数最小。此时，注意选择各仪表的量程。

调节电动机电枢调节电阻 R_1 至最大，磁场调节电阻 R_f 至最小，起动可调直流稳压电源，使电机旋转。从数字转速表上观察电机旋转方向，若电动机反转，可先停机，将电枢或励磁两端接线对调，重新起动，则电动机转向应符合正向旋转的要求。调节电动机电枢调节

电阻 R_1 至最小值，可调直流稳压电源调至 220V，再调节电动机磁场调节电阻 R_n ，使电动机（发电机）转速达到 1600r/min（额定值），并在以后整个实验过程中始终保持此额定转速不变。调节发电机磁场调节电阻 R_z ，使发电机空载电压达 $U_0 = 1.2U_N$ （240V）为止。

在保持发电机额定转速（1600r/min）条件下，从 $U_0 = 1.2U_N$ 开始，单方向调节发电机磁场调节电阻 R_z （分压器），使发电机励磁电流逐次减小，直至 $I_z = 0$ 。每次测取发电机的空载电压 U_0 和励磁电流 I_z ，记录于表 1-2 中，其中 $U_0 = U_N$ 和 $I_z = 0$ 两点必测，并在 $U_0 = U_N$ 附近测点应较密。

表 1-2 实验数据 $n = n_N = 1600\text{r/min}$

项目	数据							
U_0/V								
I_z/A								

2) 外特性。在空载实验后，把发电机负载电阻 R_2 调到最大值，合上负载开关 S_2 。同时调节电动机磁场调节电阻 R_n 、发电机磁场调节电阻 R_z 和负载电阻 R_2 ，使发电机的 $n = n_N$ ， $U = U_N$ （200V）， $I = I_N$ （0.5A），该点为发电机的额定运行点，其励磁电流称为额定励磁电流 I_{zN} 。

在保持 $n = n_N$ 和 $I_z = I_{zN}$ 不变的条件下，逐渐增加负载电阻，即减少发电机负载电流，在额定负载到空载运行点范围内，每次测取发电机的电压 U 和电流 I ，直到空载（断开开关 S_2 ），共取 6、7 组数据，记录于表 1-3 中，其中，额定和空载两点必测。

表 1-3 实验数据 $n = n_N = 1600\text{r/min}$ $I_z = I_{zN}$

项目	数据							
U/V								
I/A								

3) 调整特性。断开发电机负载开关 S_2 ，调节发电机磁场调节电阻 R_z ，使发电机空载电压达额定值（ $U_N = 200\text{V}$ ）。在保持发电机 $n = n_N$ 条件下，合上负载开关 S_2 ，调节负载电阻 R_2 ，逐次增加发电机输出电流 I ，同时相应调节发电机励磁电流 I_z ，使发电机端电压保持额定值 $U = U_N$ ，从发电机的空载至额定负载范围内每次测取发电机的输出电流 I 和励磁电流 I_z ，共取 5、6 组数据记录于表 1-4 中。

表 1-4 实验数据 $n = n_N = 1600\text{r/min}$ $U = U_N = 200\text{V}$

项目	数据							
I/A								
I_z/A								

(2) 并励直流发电机 实验电路如图 1-4 所示。 R_1 、 R_n ：电动机电枢调节电阻和磁场调节电阻，位于 MEL—09； A_1 、 mA_1 ：电枢电流测量表和励磁电流测量表，位于可调直流电源和励磁电源上； mA_2 、 A_2 ：直流毫安表、电流表，位于 MEL—06； R_z ：MEL—03 中两只 900Ω 电阻相串联，并调至最大； R_2 ：采用 MEL—03 中间端和下端变阻器，采用串并联接法，阻值为 2250Ω； S_1 、 S_2 ：位于 MEL—05； V_1 、 V_2 ：直流电压表，其中 V_1 位于直流可调电源上， V_2 位于 MEL—06。

1) 观察自励过程。断开主控制屏电源开关，即按下红色“断开”按钮，“总电源”钎

匙开关拨向“关”。断开 S_1 、 S_2 ，按前述方法起动电动机，调节电动机转速，使发电机的转速 $n = n_N$ ，用直流电压表测量发电机是否有剩磁电压，若无剩磁电压，可将并励绕组改接他励进行充磁。合上开关 S_1 ，逐渐减少 R_2 ，观察电动机电枢两端电压，若电压逐渐上升，说明满足自励条件；如果不能自励建压，将励磁回路的两个端头对调连接即可。

2) 外特性。在并励直流发电机电压建立后，调节负载电阻 R_2 到最大，合上负载开关 S_2 ，调节电动机的磁场调节电阻 R_{f1} 、发电机的磁场调节电阻 R_2 和负载电阻 R_2 ，使发电机 $n = n_N$ ， $U = U_N$ ， $I = I_N$ 。

保证此时 R_2 的值和 $n = n_N$ 不变的条件下，逐步减小负载，直至 $I = 0$ ，从额定到负载运行范围内，每次测取发电机的电压 U 和电流 I ，共取 6、7 组数据，记录于表 1-5 中，其中，额定和空载两点必测。

表 1-5 实验数据 $n = n_N = 1600\text{r/min}$ $R_2 = \text{常数}$

项目	数据						
U/V							
I/A							

(3) 复励直流发电机 实验电路如图 1-5 所示。图中， R_1 、 R_{f1} ：电动机电枢调节电阻和磁场调节电阻，位于 MEL—09； A_1 、 mA_1 ：电枢电流测量表和励磁电流测量表； V_2 、 A_2 、 mA_2 ：直流电压表、安培表、毫安表，采用 MEL—06 组件； R_2 ：采用 MEL—03 中两只 900Ω 电阻串联； R_2 ：采用 MEL—03 中四只 900Ω 电阻串并联接法，最大值为 2250Ω ； S_1 、 S_2 ：单刀双掷和双刀双掷开关，位于 MEL—05 开关板上。

先合上开关 S ，将串励绕组短接，使发电机处于并励状态运行，按上述并励直流发电机外特性实验方法，调节发电机输出电流 $I = 0.5I_N$ ， $n = n_N$ ， $U = U_N$ 。再断开短路开关 S_1 ，在保持发电机 n 、 R_2 和 R_2 不变的条件下，观察发电机端电压的变化，若此电压升高即为积复励，若电压降低为差复励，如要把差复励改为积复励，对调串励绕组接线即可。

实验方法与测取并励直流发电机的外特性相同。先将发电机调到额定运行点， $n = n_N$ ， $U = U_N$ ， $I = I_N$ ，在保持此时的 R_2 和 $n = n_N$ 不变的条件下，逐次减小发电机负载电流，直至 $I = 0$ 。从额定负载到空载范围内，每次测取发电机的电压 U 和电流 I ，共取 6、7 组数据，记

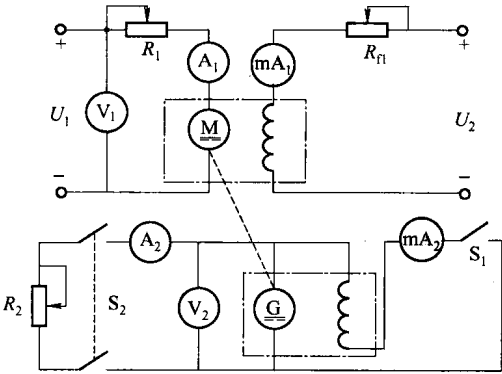


图 1-4 并励直流发电机实验电路

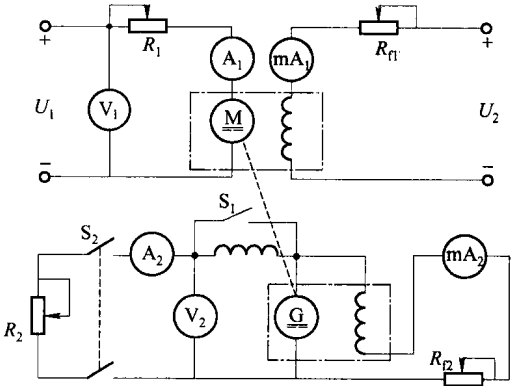


图 1-5 复励直流发电机实验电路

录于表 1-6 中，其中，额定和空载两点必测。

表 1-6 实验数据 $n = n_N =$ r/min $R_a = \text{常数}$

项目	数据							
U/V								
I/A								

5. 注意事项

- 1) 起动直流电动机时，先把 R_1 调到最大， R_2 调到最小，起动完毕后，再把 R_1 调到最小。
- 2) 做外特性时，当电流超过 0.4A 时， R_2 中串联的电阻必须调至零，以免损坏。

6. 实验报告

- 1) 根据空载实验数据，作出空载特性曲线，由空载特性曲线计算出被试电机的饱和系数和剩磁电压的百分数。
- 2) 在同一张坐标纸上绘出他励、并励和复励发电机的三条外特性曲线。分别算出三种励磁方式的电压变化率，并分析差异的原因。
- 3) 绘出他励直流发电机调整特性曲线，分析在发电机转速不变的条件下，为什么负载增加时，要保持端电压不变，必须增加励磁电流的原因。

7. 思考题

- 1) 并励直流发电机不能建立电压有哪些原因？
- 2) 在发电机—电动机组成的机组中，当发电机负载增加时，为什么机组的转速会降低？为了保持发电机的转速 $n = n_N$ ，应如何调节？

1.1.3 他励直流电动机

1. 实验目的

- 1) 掌握用实验方法测取他励直流电动机的工作特性和机械特性。
- 2) 掌握他励直流电动机的调速方法。

2. 实验项目

- 1) 工作特性和机械特性。保持 $U = U_N$ 和 $I_f = I_{fN}$ 不变，测取 n 、 T_2 、 $\eta = f(I_a)$ 及 $n = f(T_2)$ 。
- 2) 改变电枢电压的调速特性。保持 $U = U_N$ 、 $I_f = I_{fN} = \text{常数}$ ， $T_2 = \text{常数}$ ，测取 $n = f(U_a)$ 。
- 3) 改变励磁电流的调速特性。保持 $U = U_N$ 、 $T_2 = \text{常数}$ 、 $R_1 = 0$ ，测取 $n = f(I_f)$ 。

3. 实验设备及仪器

电机导轨及测功机；直流电机励磁电源、可调直流稳压电源（含直流电压表、电枢电流表、励磁电流表）；他励直流电动机 M03。

4. 实验方法及步骤

实验电路如图 1-6 所示。图中， U_1 为可调直流稳压电源； U_2 为直流他励电动机励磁电源； R_1 为电枢调节电阻； R_f 为磁场调节电阻。

- (1) 他励直流电动机的起动 将 R_1 逆时针调至最大， R_f 顺时针调至最小，电压表 V 量

程为 300V 挡，检查涡流测功机与 MEL—13 是否相连，将 MEL—13 “转速控制”和“转矩控制”选择开关扳向“转矩控制”，“转矩设定”电位器逆时针旋转到底，这时打开直流他励电动机励磁电源和可调直流稳压电源的“电源控制船形开关”，再按下可调直流稳压电源的“复位”按钮，起动直流电机，并调整电动机的旋转方向，使电动机正转（转速显示为正值）。

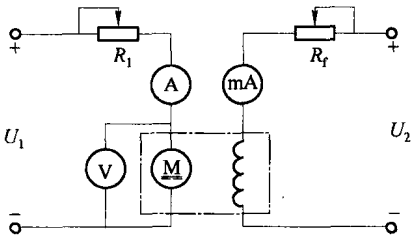


图 1-6 他励直流电动机实验电路

(2) 他励直流电动机的机械特性和工作特性

1) 按上述方法起动直流他励电动机后，将电枢调节电阻 R_1 调至零，调节直流可调稳压电源输出至 220V，再分别调节“转矩设定”电位器和磁场调节电阻 R_f ，使电动机达到额定值： $U = U_N = 220V$ ， $I_a = I_N = 1.1A$ ， $n = n_N = 1600r/min$ ，此时直流他励电动机的励磁电流 $I_f = I_{fN}$ （额定励磁电流），并记录于表 1-7 上面的空格中。

2) 保持 $U = U_N$ ， $I_f = I_{fN}$ 不变的条件下，逐次减小电动机的负载，即逆时针调节“转矩设定”电位器，测取电动机电枢电流 I_a 、转速 n 和转矩 T_2 ，记录于表 1-7 中。

表 1-7 实验数据 $U = U_N = 220V$ $I_f = I_{fN} = \text{mA}$ $R_a = \text{Ω}$

项目		数据							
实验数据	I_a/A								
	$n/(r/min)$								
	$T_2/N \cdot m$								
计算数据	P_2/W								
	P_1/W								
	$\eta(\%)$								
	$\Delta n(\%)$								

(3) 改变电枢端电压的调速

1) 按上述方法电动机正常起动后，将电阻 R_1 调至零，并同时调节直流稳压电源、“转矩设定”电位器（即调节负载）和磁场调节电阻 R_f ，使 $U = U_N$ ， $I_a = 0.5I_N$ ， $I_f = I_{fN}$ ，记录此时的 I_{fN} 、 T_2 于表 1-8 上面的空格中。

2) 保持 T_2 不变， $I_f = I_{fN}$ 不变，逐次增加 R_1 的阻值，即降低电枢两端的电压 U_a ， R_1 从零调至最大值，每次测取电动机端电压 U_a 、转速 n 和电枢电流 I_a ，记录于表 1-8 中。

表 1-8 实验数据 $I_f = I_{fN} = \text{mA}$ $T_2 = \text{N} \cdot m$

项目	数据							
U_a/V								
$n/(r/min)$								
I_a/A								

(4) 改变励磁电流的调速

1) 按上述方法电动机正常起动后，将电枢调节电阻 R_1 和磁场调节电阻 R_f 调至零，调节可调直流电源的输出为 220V，调节“转矩设定”电位器，使电动机的 $U = U_N$ ， $I_a =$

0.5I_N，记录此时的 T₂ 于表 1-9 上面的空格中。

2) 保持 T₂ 和 U = U_N 不变，逐次增加磁场电阻 R_f 阻值，直至 n = 1.3n_N，每次测取电动机的 n、I_f 和 I_a，填写入表 1-9 中。

表 1-9 实验数据 U = U_N = 220V T₂ = N · m

项目	数据							
I _f /mA								
n/ (r/min)								
I _a /A								

(5) 电动机的停机

- 1) R_f 顺时针调至最小，R_l 逆时针调至最大。
- 2) “转矩设定” 电位器逆时针旋转到底。
- 3) 先断开直流稳压电源的船形开关，再断开直流电机励磁电源的船形开关，最后断开总电源。

5. 注意事项

- 1) 他励直流电动机起动时，需将励磁回路串联的电阻 R_f 调到最小，先接通励磁电源，使励磁电流最大，同时必须将电枢串联起动电阻 R_l 调至最大，然后方可接通电源，使电动机正常起动，起动后，将起动电阻 R_l 调至最小，使电动机正常工作。
- 2) 他励直流电动机停机时，必须先切断电枢电源，然后断开励磁电源。同时，必须将电枢串联电阻 R_l 调回最大值，励磁回路串联的电阻 R_f 调到最小值，为下次起动作好准备。

3) 测量前注意仪表的量程及极性、接法。

6. 实验报告

1) 由表 1-7 计算出 P₂ 和 η，并绘出 n、T₂、η = f (I_a) 及 n = f (T₂) 的特性曲线。

电动机输出功率

$$P_2 = 0.105n T_2$$

电动机输入功率

$$P_1 = UI$$

电动机效率

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

转速变化率

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_N}{n_N} \times 100\%$$

2) 绘出他励直流电动机调速特性曲线 n = f (U_a) 和 n = f (I_f)。分析在恒转矩负载时两种调速的电枢电流变化规律以及两种调速方法的优缺点。

3) 实验报告参考格式见附录 C。

7. 思考题

- 1) 他励直流电动机的转速特性 n = f (I_a) 为什么是略微下降？是否会出现上翘现象？为什么？上翘的转速特性对电动机运行有何影响？
- 2) 当电动机负载转矩和励磁电流不变时，减小电枢端电压，为什么会引起电动机转速