



电机原理及拖动

实验教程

梁雪 贾旭 张羽 主编



东北大学出版社
Northeastern University Press

电机原理及拖动实验教程

梁雪 贾旭 张朋 主编

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 梁雪 贾旭 张朋 2016

图书在版编目 (CIP) 数据

电机原理及拖动实验教程 / 梁雪, 贾旭, 张朋主编. — 沈阳: 东北大学出版社, 2016. 4

ISBN 978-7-5517-1245-3

I. ①电… II. ①梁… ②贾… ③张… III. ①电机学—实验—教材 ②电力传动—实验—教材 IV. ①TM3-33 ②TM921-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 066140 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路三号巷 11 号

邮编: 110819

电话: 024-83687331(市场部) 83680267(社务部)

传真: 024-83680180(市场部) 83687332(社务部)

E-mail: neuph@neupress.com

http://www.neupress.com

印 刷 者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 7.25

字 数: 168 千字

出版时间: 2016 年 4 月第 1 版

印刷时间: 2016 年 4 月第 1 次印刷

策划编辑: 孙 锋

责任编辑: 潘佳宁

封面设计: 刘江旸

责任校对: 图 图

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-1245-3

定 价: 20.00 元

实践教学是高等教育不可缺少的重要组成部分,是巩固理论知识和加深对理论认识的有效途径,是培养具有创新精神和实践能力的高素质工程技术人员的重要环节。重视实践教学在整个高等教育教学工作中的地位,将对高校创新人才的培养起到推动性的作用。

在全国高校贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要》(2010—2020)的大背景下,2010年教育部启动了“卓越工程师教育培养计划”(简称“卓越计划”),“卓越计划”旨在以实际工程为背景,培养学生的工程意识、工程素养和工程实践能力,造就一大批具备较强创新能力,适应社会企业发展需要的高质量工程应用型人才。为促进电子信息领域应用型人才培养,提高工程教育人才培养质量。东北大学信息科学与工程学院实验中心联合东北大学出版社组织编写了此套《高等院校电子信息系列实验教程》。

此套丛书的特点是:

(1) 以培养学生实践能力、创新能力为宗旨,以培养和锻炼学生的实践动手能力为核心,编者将本套丛书的实验分为课前预习,实验指导和实验报告三部分内容。

课前预习部分将理论课堂已讲授过的理论或属于基础性实验的预习内容,以填空题、选择题或简答题等方式给出。学生需通过复习相关理论知识、扩展阅读及理解相关实验原理后,经过深入思考才能完成预习部分的题目。另外,这些预习题的得分将计入学生的实验成绩。

实验指导部分只将关键的步骤予以指导,而细节部分则需要学生在实践过程中自行摸索。编者们根据多年的授课经验,只对于一些容易错、耗时间长且属于基础的部分进行了详细的解释说明,略去了具体实验过程的说明。除此之外,在一些理论和实际联系紧密之处设置了思考题,进一步帮助学生

理论联系实际。

实验报告部分以活页的形式,将实验目的、要求等基本信息直接印在其中,突出实验过程的实现和实验结果的分析,学生直接在预留位置填写相关内容。

(2) 实验内容新颖,淘汰陈旧过时的内容,融入新的先进实用的知识。

(3) 对学生分类设计实验内容,包括基础验证型实验、设计型实验、综合型实验和创新型实验,学生可以根据自己的实际情况,在完成必做的实验后,自主选择更高要求的实验。不同实验有不同的最高得分。

(4) 此系列实践教材几乎涵盖了电类专业的所有实践课程。

东北大学信息科学与工程学院 李鸿儒

2014年4月

电机原理及拖动实验是自动化专业电机原理及拖动课程的重要组成部分,也是学习研究电机原理的重要环节。它的先修课程是“电机原理及拖动”“电机学”,它的实验也是在“电工原理”和电工技术等实验课的基础上进行的,比较接近工程实际,同时也是学生首次接触大功率设备的实验。基础课的实验侧重于基础理论的消化与巩固,专业课的实验偏重于对系统的分析与研究。而电机原理与拖动实验则兼顾对基础理论的验证和对实际问题的研究这两方面。因此电机原理及拖动实验具有用电设备功率较大、接近工程实际、涉及电量和非电量的测量、电量和机械转动量的测量等特点。

电机原理及拖动实验的目的在于通过实验验证和研究课堂讲授的电机基本理论,使学生掌握电机试验的基本方法和操作技能。本书从基础理论出发,旨在帮助读者将理论与实际有机结合,结合理论分析实验的现象与准确性。本书共七章,第1章为对实验系统的简介及实验的安全操作规程;第2章为直流电机部分实验,包含:直流电动机的试运转与发电机的运行特性实验,直流电动机的机械特性实验与制动实验;第3章为变压器实验;第4章为异步电机及拖动部分实验,包含:三相异步电动机的转子开路实验,参数测定实验与机械特性实验;第5章为鼠笼电机实验;第6章为同步电机实验;第7章为实验报告部分。

本书适合于高等学校自动化专业、电气工程及其自动化专业以及相关专业的师生使用,也可以作为成人高等教育、高职高专教育相关专业的师生使用。

1	电机实验概述	1
1.1	电机实验的基本要求	1
1.2	误差分析	2
1.3	电机拖动实验安全操作规程	4
2	直流电机实验	5
2.1	他励直流电动机的试运转及直流发电机的运行特性	5
2.2	他励直流电动机的机械特性与工作特性	12
2.3	他励直流电动机的制动	19
3	变压器实验	27
3.1	单相变压器的参数测定	27
3.2	三相变压器的联结组测定	33
4	异步电机及拖动实验	38
4.1	三相异步电动机的参数测定	38
4.2	三相异步电动机的转子开路实验	44
4.3	三相异步电动机的机械特性	50
5	三相鼠笼电机实验	55
5.1	三相鼠笼式异步电动机的工作特性测试	55
5.2	三相鼠笼式异步电动机的启动与调速	62

6	同步电机实验	66
6.1	三相同步发电机的空载、短路特性实验	66
6.2	同步发电机的外特性和调整特性	70
7	实验报告	75
7.1	他励直流电动机的试运转及直流发电机的运行特性	75
7.2	他励直流电动机的机械特性与工作特性	79
7.3	他励直流电动机的制动	81
7.4	单相变压器的参数测定	83
7.5	三相变压器的联结组测定	85
7.6	三相异步电动机的参数测定	87
7.7	三相异步电动机的转子开路实验	91
7.8	三相异步电动机的机械特性	93
7.9	三相鼠笼式异步电动机的工作特性测试	97
7.10	三相鼠笼式异步电动机的启动与调速	101
7.11	三相同步发电机的空载、短路特性实验	103
7.12	同步发电机的外特性和调整特性	105
	参考文献	107

1 电机实验概述

1.1 电机实验的基本要求

电机实验的目的在于培养学生掌握基本的电机实验方法与操作技能,使学生能够根据实验目的拟定实验线路,选择所需仪表,确定实验步骤,测量所需数据并分析数据得出实验结论。学生通过电机试验,可以验证和深化所学的电机与拖动理论。本书实验部分所用设备为 eEMD1000 电机拖动综合实验教学装置。在实验过程中,必须严肃认真按下列基本要求进行。

1.1.1 实验前的准备

实验前预习关系着实验能否顺利进行,实验前应复习教材相关章节,认真研读实验指导书,明确实验目的、了解实验基本原理及实验线路、方法、步骤,清楚实验中要观察哪些现象,并明确实验过程中应注意的问题。

完成实验指导书中预习部分的内容,经指导教师检查确认做好实验前的准备后,方可进行实验。

进入实验室前应了解有关实验室的安全操作规程。

1.1.2 实验的进行

(1) 建立小组,合理分工并相互轮换。实验以小组为单位进行,每组由 2~3 人组成。对于实验过程中的接线、调节负载、调整给定电压和电流、记录数据等应有明确的分工,并有轮换,以保证实验操作的协调,数据记录的准确可靠。

(2) 实验前先熟悉本次实验所用的仪器,记录电机铭牌和所选择仪表的量程,然后将仪表设备及导线布置整齐,便于实验操作及数据的测取。

(3) 正确接线。接线是除应注意线路中的仪表量程和所使用的导线的不同外,应力求线路简单明了。接线的原则是先接串联主回路,再接并联支路,即由电源开始接主要的串联电路(如电枢回路)。对于三相电路,一般都是三根导线一起连接,对于单相电路,则是由电源某一极出发,连接主回路所经的各个设备,然后返回电源的另一极,再在主回路上并联其他的设备(如电压表等)。

(4) 按规范启动电机, 观察仪表是否正常, 如出现异常应立即切断电源, 停止电机运行, 排除故障后再重新启动电机。

(5) 测量数据。在预习时应根据实验所设计的数据的大小做到心中有数, 预先考虑好所测数据点的个数(5~8点)及其取值。

(6) 实验完毕, 应将数据交给指导教师审阅, 合格后方可拆线并把实验所用的设备、导线等物品整理好。

1.1.3 实验报告

实验报告是根据实测数据和发现的问题, 经过分析研究与讨论写出的心得体会, 本书配有各实验的报告模板, 学生在完成实验后填写相应的实验报告, 并满足如下要求。

(1) 填写基础信息, 如专业班级、姓名、学号、组别和实验日期。

(2) 将实验所得原始数据记录整理后填写在相应的表格里。

(3) 整理并计算数据, 列出所用公式。

(4) 按记录和计算的数据绘制曲线, 要求比例适当, 坐标轴上要标出物理量的符号和单位、比例以及曲线的名称。曲线要用曲线板或直尺绘制, 尽量光滑, 除有要求外不要画成折线, 不在曲线上的点按实际数据标出。

(5) 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相符, 并对某些问题提出一些自己的见解和结论。同时实验报告做到简明扼要, 字迹整洁, 图标整洁, 条理清晰, 结论明确。

(6) 实验报告每人独立完成一份, 按时交送指导教师批阅。

1.2 误差分析

1.2.1 误差的定义

测量值与真实值之间的差异称为误差, 物理实验离不开对物理量的测量, 测量有直接的, 也有间接的。由于仪器、实验条件、环境等因素的限制, 测量不可能无限精确, 物理量的测量值与客观存在的真实值之间总会存在着一定的差异, 这种差异就是测量误差。误差与错误不同, 错误是应该而且可以避免的, 而误差是不可能绝对避免的。

(1) 绝对误差。设某物理量的测量值为 x , 它的真值为 a , 则 $x - a = \Delta$; 由此式所表示的误差 Δ 和测量值 x 具有相同的单位, 它反映测量值偏离真值的大小, 所以称为绝对误差(即测量值与真实值之差的绝对值)。

绝对误差可定义为

$$\Delta = X - L$$

式中, Δ ——绝对误差;

X ——测量值;

L ——真实值.

注:绝对误差是有正负、有方向的。

(2) 相对误差。误差还有一种表示方法,叫相对误差,它是绝对误差与测量值或多次测量的平均值的比值,并且通常将其结果表示成非分数的形式,所以也叫百分误差。

对于两个绝对误差一致但真值不同的物理量来说,相对误差要优于绝对误差。例如,测量两个电阻的绝对误差都为 0.1Ω , 但 $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 100\Omega$, 尽管 ΔR 一致,但是不能说两者的测量精度是一样的,因为 ΔR 对于 R_1 来说是 10% , 而对于 R_2 来说则是 0.1% , 即 R_2 的测量结果要优于 R_1 。

(3) 引用误差。仪表某一刻度点读数的绝对误差 Δ 比上仪表量程上限 A_m , 并用百分数表示。

最大引用误差:仪表在整个量程范围内的最大示值的绝对误差 Δ_m 比仪表量程上限 A_m , 并用百分数表示。

1.2.2 误差的处理

测量是有误差的定量过程,我们无法获得被测量的真值,但是,偶然误差符合高斯分布,我们可以通过平均法减小偶然误差。对于电机实验而言,电压、电流、功率等量本身也是一个不稳定的量。在输入条件不变的情况下,其波动一般符合一定的规律,即有周期性。

平均处理可以减小测试系统的偶然误差,可提高测试结果的精密度,对于稳定的测量对象,平均点数越多越好。平均处理可减小周期波动信号的读数波动,平均点数应与一个或多个周期波动对应的点数相符,或远大于波动周期对应的点数。

常用的误差处理方式还有绘图法,使用绘图法处理数据,有以下几个要点。

(1) 选择图纸,作图纸有直角坐标纸(即毫米方格纸)、对数坐标纸和极坐标纸等,根据作图需要选择。在物理实验中比较常用的是毫米方格纸。

(2) 确定坐标比例与标度,合理选择坐标比例是绘图法的关键所在。作图时通常以自变量作横坐标(x 轴),因变量作纵坐标(y 轴)。坐标轴确定后,用粗实线在坐标纸上描出坐标轴,并注明坐标轴所代表物理量的符号和单位。在坐标轴上均匀地标出所代表物理量的数值,标记所用的有效数字位数应与实验数据的有效数字位数相同。标度不一定从零开始,一般用小于实验数据最小值的某一数作为坐标轴的起始点,用大于实验数据最大值的某一数作为终点,这样图纸可以被充分利用。

(3) 曲线的描绘。由实验数据点描绘出平滑的实验曲线,连线要用透明直尺或三角板、曲线板等拟合。根据随机误差理论,实验数据应均匀分布在曲线两侧,与曲线的距离尽可能小。个别偏离曲线较远的点,应检查标点是否错误,若无误表明该点可能是错误数据,在连线时应不予考虑。

1.3 电机拖动实验安全操作规程

电机拖动实验的电源一般分为 220V 和 380V 两种, 远高于安全电压值。如发生触发则足以使人死亡, 同时电机的转动部分也易引起事故。为了在确保实验室人身安全与设备安全的前提下能够保证按时完成电机实验, 要严格遵守实验室的安全操作规程。一般电机拖动实验室的安全操作注意事项如下。

(1) 人体严禁接触带电线路。进行实验时应严格遵守先接线后送电、先断电后拆线的操作程序。通电之前注意通知他人, 切勿在其他人连线时给电, 以免造成损伤。

(2) 严禁带电操作。在改接线路时应特别注意严禁带电操作, 以免发生触电事故。实验时不得赤脚或者穿拖鞋, 最好穿胶鞋。

(3) 实验时应特别注意衣角、头发、导线等不得靠近旋转部分, 防止被卷入, 更不得用手去触摸电机的启动与停转, 以免发生危险。

(4) 学生独立完成接改线路后, 必须经指导教师检查允许, 在提示全组同学注意后, 方可合上电源开关。

(5) 实验过程中若发生异常现象, 应立即切断电源, 待查明原因、排除故障后方可继续实验。

(6) 按照实验要求合理选择仪表类型/量程/精度等。

(7) 接线要牢固, 防止发生电机超速或者飞车事故以致损坏设备, 例如: 直流电机励磁回路若发生断路会导致飞车事故的发生, 对设备及人员造成伤害; 励磁回路中电阻值设置不合理可能导致电机启动电流过大, 损毁电机。

(8) 电机停机时应逐渐降低电源电压而不是直接断开电源开关, 以免回路中电感在断电时续流产生的过电压。

2 直流电机实验

2.1 他励直流电动机的试运转及直流发电机的运行特性

2.1.1 预习内容

(1) 请写出以下四个图所表示的励磁方式分别是什么。

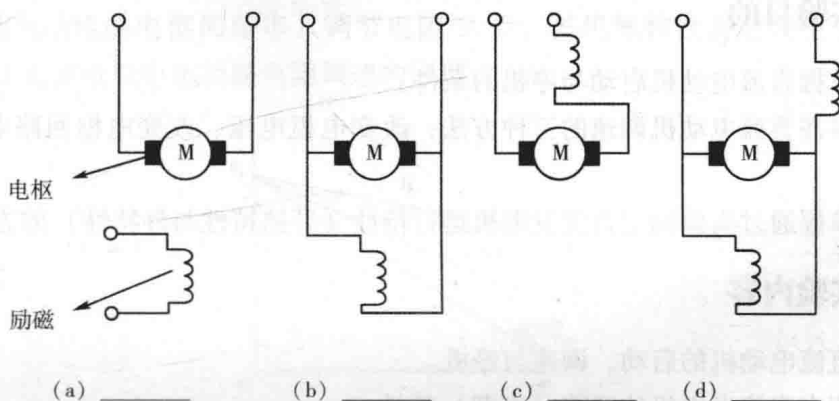


图 2-1 直流电机的励磁方式图

(2) 直流电动机的启动要求主要有两条，分别为_____、_____。

(3) 为了限制启动电流，可采取的方法有：_____、_____。

(4) 直流电动机常见的调速方法有哪几种？

(5) 如何改变他励直流电动机的转向？

(6) 直流电动机的电势平衡方程和发电机的电势平衡方程分别是什么？

(7) 什么是直流发电机的运行特性？

(8) 什么是他励直流发电机的开路特性?

(9) 为什么直流发电机的开路特性具有磁滞回线的形状?

(10) 请思考, 为什么在做直流发电机开路特性实验时, 要保持励磁电流单调变化 (单纯的递增或递减)?

(11) 什么是他励直流发电机的外特性?

(12) 什么是直流电机的额定励磁电流?

2.1.2 实验目的

- (1) 掌握直流电动机启动与停机的条件。
- (2) 掌握直流电动机调速的三种方法: 改变电枢电压、改变电枢回路电阻、改变励磁。
- (3) 掌握通过实验测定直流发电机运行特性 (开路特性与外特性) 的方法。

2.1.3 实验内容

- (1) 直流电动机的启动、调速与停机。
- (2) 测定直流发电机的开路 (空载) 特性。
- (3) 测定直流发电机的外特性。

2.1.4 实验原理

电枢绕组的感应电势为:

$$E_a = C_e \Phi n \quad (2-1)$$

式中, C_e 为常数, 当转速 n 的单位为 r/min , 每极磁通 Φ 的单位为 Wb 时, E_a 的单位为 V 。

由式 (2-1) 可知, 电枢绕组感应电势的大小, 与转速和每极磁通成正比。

当直流电动机电枢绕组中流过的电流与气隙磁场作用时, 将产生电磁转矩, 使转子旋转。电磁转矩的公式可推导为:

$$T = C_T \Phi I_a \quad (2-2)$$

式中, C_T 为常数; I_a 为电枢电流。

由式 (2-2) 可知, 直流电机的电磁转矩与电枢电流和每极磁通成正比。

直流电动机的调速实质上是改变了电动机的机械特性 (机械特性详见本书 2.2 节),

使之与负载的机械特性交点改变，达到调速的目的。

这里先直接给出直流电动机机械特性的公式：

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a + R_p}{C_e C_T \Phi^2} T \quad (2-3)$$

式中， U 为电枢电压； R_a 为电枢绕组阻值； R_p 为电枢回路串联电阻阻值。

由于电动机的电枢电压不能超过额定电压，因此在调速时，电压只能由额定电压向低调，由式 (2-3) 与图 2-2 可知改变电枢电压调速的原理。

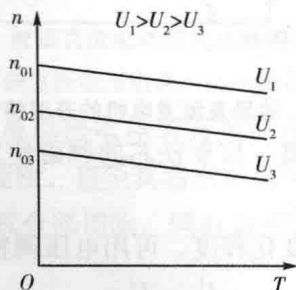


图 2-2 改变电枢电压时转速的变化情况

他励直流电动机的电枢回路串入调节电阻 R_p 后，其机械特性将会发生变化，由式 (2-3) 与图 2-3 可知改变电枢回路电阻调速的原理。

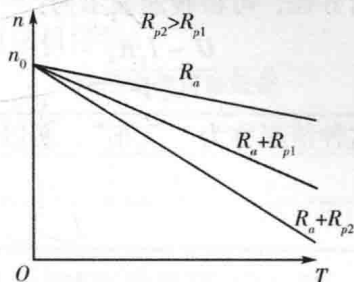


图 2-3 改变电枢回路串联电阻时转速的变化情况

通过调节他励（或并励）直流电动机励磁回路串入的调节电阻，可以改变励磁电流，即改变磁通 Φ 。为使电机不至于过饱和，因此磁通 Φ 只能由额定值减小。由式 (2-3) 与图 2-4 可知改变励磁调速的原理。

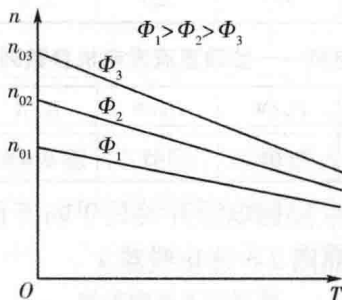


图 2-4 改变励磁时转速的变化情况

图 2-5 所示为他励直流发电机的开路特性曲线, 在励磁电流上升的过程中形成上升支, 励磁电流下降的过程中形成下降支。其下降支最后与纵轴交于点 U_s 。

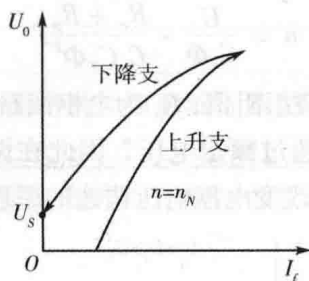


图 2-5 他励直流发电机的开路特性曲线

发电机在旋转时, 不外加励磁, 只靠铁芯的剩磁使发电机发出的电压被称为剩磁电压, 图 2-5 中点 U_s 即为剩磁电压。

发电机从空载到满载的电压变化程度, 可用电压调整率来表示, 其数学表达式如下:

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (2-4)$$

式中, U_0 是励磁电流为额定时的开路电压。

对于一般的他励直流发电机, ΔU 为 5% ~ 10%。

根据电动势公式和电压平衡方程, 可将转速表示为:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (2-5)$$

当 $\Phi = 0$ 时, $n = \infty$, 我们把这种情况称为“飞车”, 所以他励直流电动机的励磁电流在任何情况下都不能等于 0。

2.1.5 实验步骤

2.1.5.1 直流电动机的启动、调速与停机

本实验用到的实验电机为直流测功机, 其相关参数如表 2-1 所示。

表 2-1 实验电机——直流测功机参数列表

编号	分类	$n_N / (\text{r/min})$	P_N / W	U_N / V	I_N / A	U_{fN} / V	I_{fN} / A	绝缘等级
130SZ02	电动机	1500	355	220	2.2	220	<0.18	E

表 2-2 实验电机——他励直流发电机参数列表

编号	分类	$n_N / (\text{r/min})$	P_N / W	U_N / V	I_N / A	U_{fN} / V	I_{fN} / A	绝缘等级
eBDC1000	发电机	1600	110	185	0.6	220	<0.16	E

(1) 确认可调直流稳压电源、励磁电源开关处于断开位置, 可调直流稳压电源输出调节旋钮处于最小值位置, 并按照图 2-6 连接线路。

(2) 电动机的启动。

① 调节电枢调节电阻器 R 至最大值 (限制起动电流), 磁场电阻调节器 R_f 至最小值 (保证满励磁启动)。

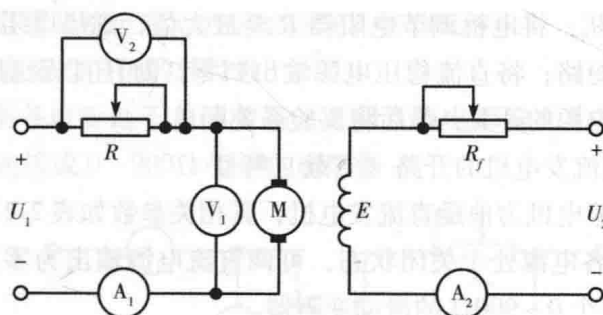


图 2-6 他励直流电动机试运转实验线路

U_1 —可调直流稳压电源； U_2 —励磁电源

② 实验系统上电，先闭合直流励磁电压源开关，再闭合直流稳压电源及加载箱电源；缓慢调节可调直流电源调压旋钮，直至其输出为 220V。

③ 逐步减小电阻 R ，直至将其全部切除，同时观察转速表，以防止其转速超过电动机的额定值。

(3) 电动机的调速。

① 改变电枢电压调速：完成实验步骤（2）后，平稳调节可调直流电源调压旋钮，使电枢电压降低，在此过程中测量转速 n ，电枢电压 U_a 及电枢电流值 I_a ，测取数据时， $U_a = U_N$ 点必测，且在其附近多测几组，共测量 6 组数据，记录于表 2-3 中。完成数据记录后，按照实验步骤（4）使电动机停机。

表 2-3 降压调速实验数据

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

② 改变电枢调节电阻调速：完成实验步骤（2）后，逐步增大电阻 R ，在此过程中测量转速 n ，电阻 R 两端电压 U_R 及电枢电流值 I_a ，共测量 6 组数据，记录于表 2-4 中，其中 $R = U_R/I_a$ 。完成数据记录后，按照实验步骤（4）使电动机停机。

表 2-4 改变电枢调节电阻调速实验数据

$n/(r/min)$					
U_R/V					
I_a/A					
R/Ω					

③ 改变励磁调速：完成实验步骤（2）后，缓慢增大电阻 R_f ，减小励磁电流，在此过程中测量转速 n 和励磁电流 I_f 的值，并注意观察转速表，保证电机转速不要超过 1750r/min，共测量 4 组数据，记录于表 2-5 中。完成数据记录后，按照实验步骤（4）使电动机停机。

表 2-5 弱磁调速实验数据

$n/(r/min)$				
I_f/mA				