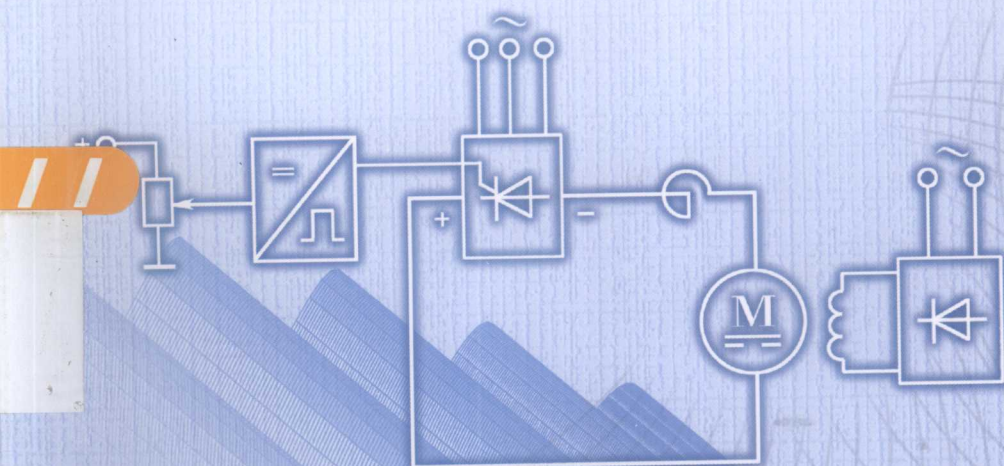




西安交通大学 本科“十二五”规划教材
“985”工程三期重点建设实验系列教材

运动控制系统综合实验教程

主编 杨国安
参编 刘小勇 杨 旻



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

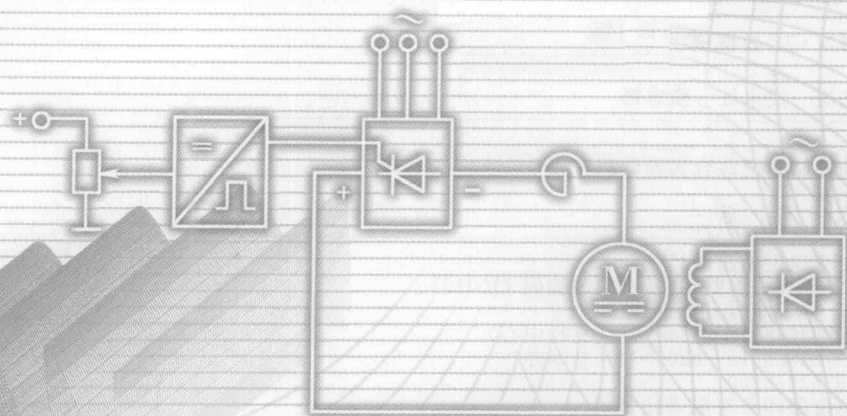


西安交通大学 本科“十二
“985”工程三期

运动控制系统综合实验教程

主编 杨国安

参编 刘小勇 杨 旻



TP-73-33
08



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本实验教程以 NMCL-Ⅲ型电力电子及运动控制实验教学装置为主线,较为详细地介绍了电力电子技术、电机学、电力拖动自动控制系统和运动控制系统等课程的实验内容、实验原理和实验方法,并适用于开设运动控制系统专题实验,以培养学生自主设计能力、综合实验能力、创新意识和创新能力。主要内容包括电力电子基础实验、电机学基础实验、直流调速系统实验、交流调速系统实验和伺服电机控制系统实验五个部分,并将基于 DSP 芯片的数字控制、基于 Matlab/Simulink 仿真设计和基于 Labview 的网络化虚拟实现技术融合到相关章节中,使之具有足够的扩展空间,以适应未来进一步的实验教学要求。

本书可作为自动化专业、电气工程及其自动化专业,以及其他自动化类和电气类的本科生实验教学用书,同时对从事电力电子技术、电机与拖动、电力拖动自动控制系统、运动控制系统的工程技术人员也有较好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

运动控制系统综合实验教程/杨国安编;杨阳编.

—西安:西安交通大学出版社,2014.3

ISBN 978-7-5605-6064-9

I. ①运… II. ①杨… III. ①自动控制
系统—高等学校—教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 041904 号

策 划 程光旭 成永红 徐忠锋

书 名 运动控制系统综合实验教程
主 编 杨国安
责任编辑 季苏平 王 欣

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315 82669096(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 陕西奇彩印务有限责任公司

开 本 727mm×960mm 1/16 印张 23.25 字数 428 千字
版次 2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷
次 号 ISBN 978-7-5605-6064-9/TP·615
书 定 价 45.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdlgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

编审委员会

主 任 冯博琴

委 员 （按姓氏笔画排序）

邓建国 何茂刚 张建保 陈雪峰

罗先觉 郑智平 徐忠铎 黄 辰

Preface 序

教育部《关于全面提高高等教育质量的若干意见》(教高[2012]4号)第八条“强化实践育人环节”指出,要制定加强高校实践育人工作的办法。《意见》要求高校分类制订实践教学标准;增加实践教学比重,确保各类专业实践教学必要的学分(学时);组织编写一批优秀实验教材;重点建设一批国家级实验教学示范中心、国家大学生校外实践教育基地……。这一被我们习惯称之为“质量30条”的文件,“实践育人”被专门列了一条,意义深远。

目前,我国正处在努力建设人才资源强国的关键时期,高等学校更需具备战略性眼光,从造就强国之才的长远观点出发,重新审视实验教学的定位。事实上,精心设计的实验教学更适合承担起培养多学科综合素质人才的重任,为培养复合型创新人才服务。

早在1995年,西安交通大学就率先提出创建基础教学实验中心的构想,通过实验中心的建立和完善,将基本知识、基本技能、实验能力训练融为一炉,实现教师资源、设备资源和管理人员一体化管理,突破以课程或专业设置实验室的传统管理模式,向根据学科群组建基础实验和跨学科专业基础实验大平台的模式转变。以此为起点,学校以高素质创新人才培养为核心,相继建成8个国家级、6个省级实验教学示范中心和16个校级实验教学中心,形成了重点学科有布局的国家、省、校三级实验教学中心体系。2012年7月,学校从“985工程”三期重点建设经费中专门划拨经费资助立项系列实验教材,并纳入到“西安交通大学本科‘十二五’规划教材”系列,反映了学校对实验教学的重视。从教材的立项到建设,教师们热情相当高,经过近一年的努力,这批教材已见端倪。

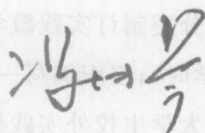
我很高兴地看到这次立项教材有几个优点:一是覆盖面较宽,能确实解决实验教学中的一些问题,系列实验教材涉及全校12个学院和一批重要的课程;二是质

量有保证,90%的教材都是在多年使用的讲义的基础上编写而成的,教材的作者大多是具有丰富教学经验的一线教师,新教材贴近教学实际;三是按西安交大《2010版本科培养方案》编写,紧密结合学校当前教学方案,符合西安交大人才培养规格和学科特色。

最后,我要向这些作者表示感谢,对他们的奉献表示敬意,并期望这些书能受到学生欢迎,同时希望作者不断改版,形成精品,为中国的高等教育做出贡献。

西安交通大学教授

国家级教学名师



2013年6月1日

Foreword 前言

根据《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》的指导精神和教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》,我国高等教育应该实行课程教学与实验教学并重的基本方针,应着眼于国家发展和人才的全面发展需要,坚持知识、能力、素质协调发展,注重能力培养。为适应新形势下的要求,西安交通大学大力支持通过实验教学使得学生加深认识理论的正确性和实感性,纠正错误的理论理解,发现新技术,加强学生探索、创新、开拓的精神并培养学生严肃认真、实事求是的科学作风。本实验教程自成体系,实验内容与理论教学各有相对的独立性,便于单独开设专题实验课,同时也适合随理论课进行的基础实验教学。本教程在理论与实践相结合方面留给学生充分的思考余地,以利于培养和提高学生的实际动手能力和独立分析问题、解决问题的能力。

运动控制系统是以电动机为被控对象的机械运动自动控制,是一种电力拖动自动控制系统,是工业自动化领域的重要分支,具有很强的应用背景。运动控制系统是我国高等学校工科自动化类的专业课程,涉及的知识领域包括控制技术、计算机技术、电力电子技术、电机与拖动等,具有很强的综合性。因此,运动控制系统的实验教学特别是专题实验教学不仅可以对理论知识加深理解,而且可以通过理论知识的融会贯通与应用,建立“系统”的整体概念,领会系统分析的思想,培养学生在实际应用中分析问题和解决问题的能力,以及探索问题、研究问题的创新精神。

以往的运动控制系统实验教学设备多为模拟量控制的实验装置,且以直流调速系统实验装置为主。由于交流调速系统的复杂性,采用模拟量控制方式的实验装置难以较好地达到实验目的。随着以DSP为标志的数字控制技术的发展,以计算机为核心的数字控制调速系统越来越广泛并深入到工业自动化应用的各个领域。因此在运动控制系统实验教学中引入数字控制技术和计算机控制技术,可以打破以往模拟量控制的局限性,提高运动控制系统实验教学的灵活性、可扩展性和准确性,实现现代交流调速系统和伺服调速系统的实验内容,弥补以往运动控制系统实验教学内容的不足。

本实验教程综合了电力电子技术、电机学、电力拖动自动控制系统和运动控制

系统等课程教学大纲中的实验内容,并考虑到开设专题实验的需求,以王兆安主编的《电力电子技术》第5版和陈伯时主编的《电力拖动自动控制系统——运动控制系统》第3版为基准,同时以浙江大学电气学院电机系和浙江求是科教设备有限公司合作研制的NMCL-Ⅲ型现代电力电子技术及运动控制系统实验教学装置为实验教学平台编写而成。主要内容包括实验装置的技术性能以及各单元的组件挂箱介绍,电力电子技术、电机学、电力拖动自动控制系统和运动控制系统等课程共计45个相关实验的实验目的、实验内容、实验原理和实验方法,除保留传统实验项目外,还增加了现代电力电子电路,Buck-Boost变换器研究,单相斩波交流调压实验研究,单相正弦波脉宽调制(SPWM)逆变电路实验研究,微机控制脉宽调制(SPWM)变频调速系统实验研究,电压空间矢量脉宽调制(SVPWM)变频调速系统实验研究,SPWM和SVPWM变频调速系统,采用DSP的磁场定向控制(FOC)变频调速系统实验研究,基于DSP的矢量控制变频调速实验,直接转矩控制(DTC)变频调速系统实验研究,采用DSP控制的直流方波无刷电机(BLDCM)调速系统实验研究,直流和交流伺服控制系统特性实验,DSP控制的同步电机伺服系统实验研究等新型内容。

NMCL-Ⅲ型现代电力电子技术及运动控制系统实验装置是一种依据组件化、模块化理念而设计的具有强扩展能力的大型综合性实验装置,可以根据电力电子器件、电力电子技术、电机技术和运动控制技术的发展而开发新的组件挂箱,开设新的实验;各学校可根据自身需要,选择相关组件挂箱。除本教程列出的实验项目外,学生还能以此实验装置为平台,设计相应的研究型实验。本教程在实验内容的编排上以相关新型实验设备为主线,既反映了学科本身的系统性,又结合了本学科的最新技术成果,全面满足了课程教学和实验教学大纲的基本要求。

本书由西安交通大学杨国安副教授、刘小勇副教授、杨旸讲师共同编写。其中第1、7章由杨国安编写,第6章由杨国安和刘小勇共同编写,第3、4、5章由杨国安和杨旸共同编写,全书由杨国安统稿。

另外,在本实验教程编写过程中,浙江求是科教设备有限公司和天煌科技实业有限公司提供了相关资料,上海大学机电工程与自动化学院阮毅教授对本书的编写提出了许多宝贵建议,在此谨表示诚挚的感谢。

限于编者的水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2013年6月于西安交通大学电子与信息工程学院

Contents 目录

第 1 章 实验概述	(1)
1.1 实验要求	(1)
1.2 实验准备	(2)
1.3 实验实施	(2)
1.4 实验分析	(3)
第 2 章 实验装置	(5)
2.1 概述	(5)
2.2 实验装置的主要特点	(5)
2.3 实验装置及电机的技术参数	(7)
2.4 实验装置的挂箱配置	(8)
2.5 实验装置的安全与保护	(9)
2.6 实验装置的实验项目	(10)
2.7 主要实验挂箱的使用说明	(12)
2.7.1 电源控制屏	(12)
2.7.2 低压控制电路及仪表	(13)
2.7.3 可调电阻	(14)
2.7.4 触发电路和晶闸管主回路	(16)
2.7.5 功率器件	(17)
2.7.6 直流调速控制单元	(18)
2.7.7 现代电力电子电路和直流脉宽调速	(18)
2.7.8 触发电路	(21)
2.7.9 微机控制脉宽调制 (SPWM) 变频调速系统	(22)
2.7.10 DSP 控制的高性能直流无刷电机调速实验系统	(22)

2.7.11	基于 DSP 的研究型变频调速系统	(24)
2.7.12	直流伺服电机控制系统	(28)
2.7.13	交流伺服电机控制系统	(29)
2.7.14	其他挂箱	(29)

第 3 章 电力电子技术基础实验 (33)

3.1	单结晶体管触发电路及单相半波可控整流电路实验	(33)
3.2	正弦波同步移相触发电路实验	(39)
3.3	锯齿波同步移相触发电路实验	(42)
3.4	单相桥式半控整流电路实验	(45)
3.5	单相桥式全控整流电路实验	(50)
3.6	单相桥式有源逆变电路实验	(54)
3.7	三相半波可控整流电路的研究	(58)
3.8	三相桥式半控整流电路实验	(62)
3.9	三相桥式全控整流及有源逆变电路实验	(70)
3.10	单相交流调压电路实验	(82)
3.11	三相交流调压电路实验	(86)
3.12	全控器件 GTR、GTO、MOSFET、IGBT 的特性与驱动电路研究	(90)
3.12.1	电力晶体管(GTR)的特性与驱动电路研究	(90)
3.12.2	门极可关断晶闸管(GTO)特性与驱动电路研究	(98)
3.12.3	电力场效应晶体管(MOSFET)的特性与驱动电路研究	(102)
3.12.4	绝缘栅双极型晶体管(IGBT)特性与驱动电路研究	(109)
3.13	采用自关断器件的单相交流调压电路研究	(117)
3.14	直流斩波电路的性能研究	(120)
3.15	全桥 DC/DC 变换电路实验	(127)
3.16	单相交-直-交变频电路的性能研究	(131)

第 4 章 电机学基础实验 (136)

4.1	直流电机基础实验	(136)
-----	----------------	-------

4.1.1	直流电机伏安法测定电枢绕组冷态电阻	(136)
4.1.2	直流并励电机特性	(140)
4.1.3	直流串励电机实验	(145)
4.1.4	直流他励电机的机械特性测试	(149)
4.2	异步电机基础实验	(155)
4.2.1	三相鼠笼式异步电机的机械特性	(155)
4.2.2	三相异步电机的起动与调速特性	(163)
4.2.3	三相异步电机的单相电阻起动	(168)
4.2.4	三相异步电机的单相电容起动	(172)
4.3	同步电机基础实验	(175)
4.3.1	三相同步电机的机械特性	(175)
4.3.2	三相同步电机的参数测定	(180)
4.4	同步发电机基础实验	(185)
4.4.1	三相同步发电机的机械特性	(185)
4.4.2	三相同步发电机的并联运行实验	(191)
第5章	直流调速系统实验	(197)
5.1	晶闸管直流调速系统参数和环节特性测定	(197)
5.2	晶闸管直流调速系统主要控制单元调试	(204)
5.3	不可逆单闭环直流调速系统静特性的研究	(209)
5.4	双闭环晶闸管不可逆直流调速系统	(216)
5.5	逻辑无环流可逆直流调速系统	(224)
5.6	双闭环可逆直流脉宽调速系统	(233)
第6章	交流调速系统实验	(247)
6.1	双闭环三相异步电机调压调速系统	(247)
6.2	双闭环三相异步电机串级调速系统	(255)
6.3	异步电机 SPWM 与 SVPWM 变频调速系统	(264)
6.4	基于 DSP 的方波无刷直流电机(BLDCM)调速系统	(277)
6.5	基于 DSP 的研究型变频调速系统	(285)

6.5.1	采用 SPWM 的开环 VVVF 调速系统	(285)
6.5.2	采用 SVPWM 的开环 VVVF 调速系统	(297)
6.5.3	采用马鞍波 PWM 的开环 VVVF 调速系统	(301)
6.5.4	采用磁场定向控制(FOC)的感应电机变频调速系统	(303)
6.5.5	感应电机直接转矩控制(DTC)的变频调速系统	(312)

第 7 章	伺服电机控制系统实验	(323)
-------	------------	-------

7.1	直流伺服电机控制系统	(323)
7.2	交流伺服电机控制系统	(334)
7.3	DSP 控制的同步电机伺服系统	(351)

参考文献	(360)
------	-------

(188)	.....	(360)
(189)	.....	(360)
(190)	.....	(360)
(191)	.....	(360)
(192)	.....	(360)
(193)	.....	(360)
(194)	.....	(360)
(195)	.....	(360)
(196)	.....	(360)
(197)	.....	(360)
(198)	.....	(360)
(199)	.....	(360)
(200)	.....	(360)
(201)	.....	(360)
(202)	.....	(360)
(203)	.....	(360)
(204)	.....	(360)
(205)	.....	(360)
(206)	.....	(360)
(207)	.....	(360)
(208)	.....	(360)
(209)	.....	(360)
(210)	.....	(360)
(211)	.....	(360)
(212)	.....	(360)
(213)	.....	(360)
(214)	.....	(360)
(215)	.....	(360)
(216)	.....	(360)
(217)	.....	(360)
(218)	.....	(360)
(219)	.....	(360)
(220)	.....	(360)
(221)	.....	(360)
(222)	.....	(360)
(223)	.....	(360)
(224)	.....	(360)
(225)	.....	(360)
(226)	.....	(360)
(227)	.....	(360)
(228)	.....	(360)

第1章 实验概述

电力电子技术是自动化专业、电气工程及自动化专业的电子技术基础课程之一,电机与拖动、电机学、电力拖动自动控制系统、运动控制系统等课程是这些专业重要的专业课或专业基础课,上述课程涉及电气、电子、控制、计算机等领域,而实验教学是这些专业课程的重要组成部分。本运动控制系统实验教程涵盖了电力电子技术基础、电机学和电力拖动自动控制系统——运动控制系统的基本知识,自成体系,便于实验教学,并通过实验教学帮助加深对基本理论的理解,综合相关知识,进行设计型综合实验甚至研究型实验项目,培养和提高实际动手能力、分析和解决问题的独立工作能力。

1.1 实验要求

电力电子技术、电机学、电力拖动自动控制系统、运动控制系统的实验教学内容繁多,实验系统比较复杂,系统性较强,特别是运动控制系统专题实验教学是上述课程理论教学的重要补充、继续和深化。而理论教学则是实验教学的基础,学生在实验中应学会运用所学的基础理论及基本知识去分析和解决实际系统中出现的各种问题,去发现新现象、新规律,并能提高动手能力,进行综合型和设计型实验,最终达到实验性研究的目的;同时,通过实验来加深理解理论,促使理论和实践相结合,使认识不断提高、深化。具体地说,学生在完成本实验教学之后可以具有以下能力:

- (1)掌握电力电子器件的主电路、驱动电路的构成及调试方法,以及设计和应用这些电路的方法。
- (2)掌握直流、交流、伺服电机的主要结构、工作原理及技术参数的测定方法。
- (3)掌握交流、直流电机控制系统的组成和调试方法,系统参数的测试和整定方法。
- (4)熟悉设计交流、直流电机调速系统的具体实验线路。
- (5)熟悉实验装置、测试仪器的基本构造、性能和使用方法。
- (6)能够运用理论知识对实验现象、实验结果进行分析和处理,解决实验中遇到的问题。

(7)能够综合实验数据,分析实验现象,编写实验报告,完成实验思考题。

本实验教程介绍了 45 个电力电子技术、电机学和运动控制系统的实验项目。电力电子技术实验可优先选做全桥整流及有源逆变电路、各类驱动触发电路、单相交流调压电路、自关断电力电子器件的驱动与保护电路、功率器件(GTR、GTO、MOSFET、IGBT)开关特性实验、交-直-交变频电路的性能研究等实验;电机学基础实验可选做直流、交流、伺服电机的基本特性实验;运动控制系统实验可选做双闭环晶闸管不可逆直流调速系统、直流脉宽可逆调速系统、DSP 控制的方波无刷直流电机(BLDCM)调速系统、微机控制交流调速系统、双闭环三相异步电机调压调速系统、双闭环三相异步电机串级调速系统、正弦波脉宽调制(SPWM)变频调速系统、基于 DSP 的矢量变换控制与直接转矩控制变频调速系统等实验。

1.2 实验准备

实验准备即实验的预习阶段,是保证实验教学顺利进行的必要环节。每次实验前都应先进行预习,从而提高实验质量和效率,否则就有可能在实验中不能准确掌握实验的基本原理,浪费时间,达不到实验要求,甚至损坏实验装置。因此,实验前应做到以下几点:

(1)复习理论课程中与实验有关的基本内容,熟悉与本次实验相关的理论知识。

(2)阅读实验教程或实验指导,了解本次实验的目的和内容,掌握本次实验的实验原理和实验方法。

(3)写出预习报告,其中包括实验系统的详细接线图、实验步骤、数据记录表格等。

(4)熟悉实验所用的实验装置、测试仪器、显示仪表等。

(5)进行实验分组。一般情况下,电力电子技术实验小组为每组 1~2 人,交流、直流调速系统实验小组和伺服调速系统实验小组为每组 2~3 人。

1.3 实验实施

在完成理论学习、实验预习等环节后,便可进入实验实施阶段。

实验时要做到以下几点:

(1)实验开始前,指导教师要对学生的预习报告做检查,要求学生了解本次实验的目的、内容和方法,只有满足此要求后,方能允许实验开始。

(2)指导教师对实验装置做介绍,要求学生熟悉本次实验使用的实验设备、测试仪器、显示仪表,明确这些设备的基本功能和使用方法。

(3)按实验小组进行实验。实验小组成员应进行明确的分工,每个人的任务应在实验进行中实行轮换,以使所有实验参加者能全面掌握实验技术,提高动手能力,并能分析各种实现现象,发现实验中出现的問題。

(4)按预习报告上的实验系统详细线路图进行接线。一般情况下,接线次序为先主电路,后控制电路;先串联,后并联。在进行调速系统实验时,也可以由2人同时进行主电路和控制电路的接线。

(5)在完成实验系统接线后,必须进行自查。串联回路从电源的某一端出发,按回路逐项检查各仪表、挂箱模块、负载的位置、极性等是否正确;并联支路则检查其两端的连接点是否正确。距离较远的两连接端必须选用长导线直接跨接,不得用2根导线在实验装置上的某接线端进行过渡连接。自查完成后,须经指导教师复查,经指导教师同意后,方可合闸通电,开始实验。

(6)实验时,应按实验教程所提出的要求及步骤,逐项进行实验和操作。除做阶跃起动实验外,系统起动前,应使负载电阻值最大,给定电位器处于零位;测试点的分布应均匀;改接线路时,必须断开主电路电源。实验中应观察实验现象是否正常,所得数据是否合理,实验结果是否与理论相一致。

(7)完成本次实验全部内容后,应请指导教师检查实验数据、记录的波形。经指导教师认可,方可拆除接线,整理好连接线、仪器、工具等,使之物归原位。

1.4 实验分析

实验的最后阶段是实验总结,即对实验数据进行整理,绘制波形和图表,分析实验现象和实验中出现的各种问题,撰写实验报告。每个实验参与者均应独立完成一份实验报告,实验报告的编写应持严肃认真、实事求是的科学态度。如果实验结果与理论有较大出入,不得随意修改实验数据和结果,用凑数据的方法来向理论靠拢,而是应用理论知识来分析实验数据和结果,解释实验现象,找出引起较大误差的真正原因。

实验报告的基本内容如下:

- (1)实验名称、班级、姓名、同组者姓名、实验时间;
- (2)实验目的、实验线路、实验内容;
- (3)实验设备、仪器、仪表的型号、规格、铭牌数据及实验装置编号;
- (4)实验数据、列表、计算,并列出计算所用的公式;
- (5)绘制与实验数据相对应的特性曲线及记录的波形;

(6) 用理论知识对实验结果进行分析和总结, 得出明确的结论;

(7) 对实验中出现的某些现象、遇到的问题进行分析、讨论, 写出心得体会, 并对实验提出自己的建议和改进措施。

第2章 实验装置

2.1 概述

NMCL-Ⅲ型电力电子及运动控制实验教学装置(见图2-1)是由浙江大学电气学院电机系和浙江求是科教设备有限公司联合开发的一种功能齐全的大型综合性实验装置,可用来完成电力电子技术、电机学、电力拖动自动控制系统、运动控制系统等系列课程的全部教学实验,并可单独开设运动控制系统专题实验。

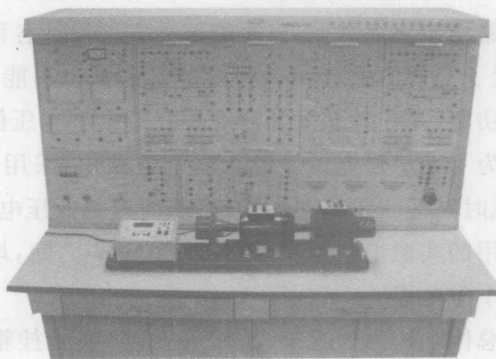


图2-1 NMCL-Ⅲ型电力电子及运动控制实验教学装置外观图

2.2 实验装置的主要特点

NMCL-Ⅲ型实验装置的主要特点如下:

(1)采用固定式模块(测量仪表、交直流电源、质量较重的模块采用固定式结构)和挂箱式模块相结合的独特结构设计,既具有常用模块的不变性,又具有不同模块的自由组合性,可以完成众多不同实验,具有较强的灵活性和可扩展性;可以减少指导教师实验前的准备工作强度。而目前市场上大多采用全挂箱式模块,每次更换实验挂箱时,需要更换多个实验箱,指导教师和学生的劳动强度较大,学生