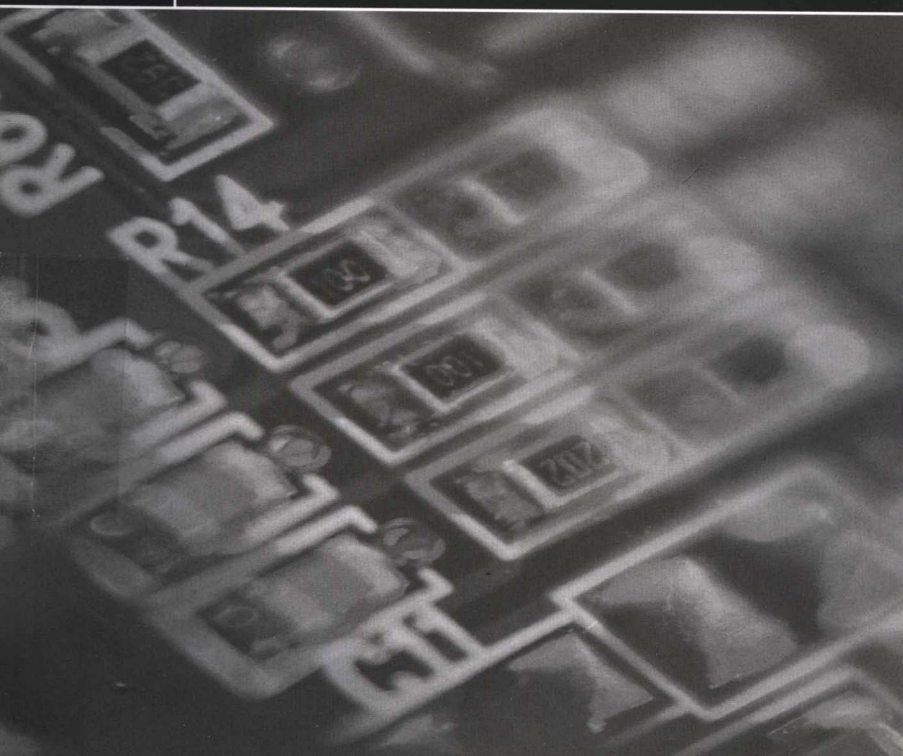


电力电子技术 实验教程

汤建新 马 皓 编著



机械工业出版社
China Machine Press

21
纪

高等院校电气信息类本科规划教材

TM1-33

17

2007

电力电子技术 实验教程

汤建新 马 皓 编著



机械工业出版社
China Machine Press

本书是按照“电力电子技术”这门课程的教学大纲和教学内容的要求,配合 DDSX 01 型电力电子技术实验系统而编写的实验教材,重点介绍了实验的工作原理及实验方法,详细介绍了 DDSX 01 型电力电子技术实验系统,围绕该实验系统的功能,设计编写了 20 个电力电子技术类实验。其中,有晶闸管整流技术实验 4 个;晶闸管调压技术实验 2 个;功率 MOSFET 自关断器件实验 3 个;直流斩波(Buck 开关变换器)等电路实验 4 个;其他有单相正弦波(SPWM)逆变电路研究、功率因数校正电路研究、移相全桥软开关电路实验、BoostZVS 软开关电路实验等 7 个实验。

本书可作为各大中专院校电气信息类、工业自动化和其他相关电气类学生的实验教材,也可供广大从事电力电子技术、自动化控制的工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术实验教程/汤建新,马皓编著. —北京:机械工业出版社,2007.3
(21世纪高等院校电气信息类本科规划教材)

ISBN 978-7-111-20860-0

I. 电… II. ①汤… ②马… III. 电力电子学—实验—高等学校—教材 IV. TM1-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 017664 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:秦燕梅

北京慧美印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2007 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·11.75 印张

定价:18.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

前 言

近年来,随着微电子、计算机技术和微电子精细加工技术的广泛运用,使得电力电子技术领域发生了巨大的变化,涌现了大量的功能接近理想化的新器件。电力电子技术越来越和微电子技术、现代控制理论、材料科学、电机工程等紧密结合,正逐步向一门多学科互相渗透的综合性技术学科发展。运用现代电力电子技术,可以高效精确地实现大功率电能的变换与传输,可以大幅度地节能,降低损耗。在资源日益匮乏的今天,这尤为重要。因此,电力电子技术在国民经济建设中发挥着越来越大的作用。

电力电子技术本质上是一门实验科学技术,而实验是检验理论的最重要的手段。对学生来说,实验质量的好坏,直接关系到理论学习的成效。为学生创造良好的实验条件,让学生在良好的实验设备环境中来完成精心编排的实验项目,这必将极大提高其对理论的理解能力、动手实践能力和研究创新能力。

DDSX 01 型电力电子技术实验系统,是浙江大学电气工程学院和浙江方圆科技股份有限公司合作研制的新型实验装置。该实验系统不仅可以进行晶闸管整流和交流调压方面的实验,而且有功率 MOSFET、IGBT 等器件静态特性及驱动电路方面的实验,有单相功率因数校正、移相全桥软开关、准谐振软开关等新电路实验。从实验电路拓扑、参数、控制电路等方面尽可能为学生提供较多的自主设计空间,学生能以此实验装置为平台,自主做一些设计型、研究型的实验。

本书共分 3 章。第 1 章是电力电子技术实验概述。第 2 章介绍了 DDSX 01 型电力电子技术实验系统各模块挂箱功能。第 3 章是电力电子技术实验项目。本书设计编写了 20 个实验,其中,晶闸管整流技术实验 4 个;

晶闸管交流调压技术实验 2 个；功率 MOSFET 等自关断器件实验 3 个；直流斩波(Buck 变换器)等电路实验 4 个；并有单相正弦波(SPWM)逆变电源研究、功率因数校正电路研究、移相全桥零电压开关变换电路研究、Boost ZVS 软开关电路实验等 7 个实验。

本书的编写受到世行贷款“高等教育发展”项目的资助；陈辉明教授认真、仔细地审阅了全书，提出了许多宝贵的意见；浙大方圆科技股份有限公司的罗长春工程师提供了许多图片资料，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏和不妥之处，恳切希望读者批评指正。

编著者

2006 年 10 月于杭州

目 录

前言

第 1 章 电力电子技术实验概述	1
1.1 实验内容和特点	1
1.2 实验守则	4
1.3 实验方法及注意事项	5
1.4 实验总结	6
第 2 章 DDSX 01 型电力电子技术实验系统简介	7
2.1 DDSX 01 型电力电子技术实验系统概述	7
2.2 DDSX 01 型“电源控制屏”简介	8
2.3 DDS 02“一、二组桥晶闸管电路”实验挂箱	10
2.4 DDS 03“晶闸管触发电路”实验挂箱	12
2.5 DDS 11“锯齿波同步移相触发电路”实验挂箱	12
2.6 DDS 12“单相交流调压触发电路”实验挂箱	15
2.7 DDS 16“电力电子自关断器件特性与驱动电路”实验挂箱	15
2.8 DDS 30“Boost APFC 与 UC3854 电路”实验挂箱	18
2.9 DDS 31“Buck 与 Buck—Boost 电路”实验挂箱	18
2.10 DDS 32“Boost Cuk 电路”实验挂箱	21
2.11 DDS 33“半桥、全桥电路”实验挂箱	21
2.12 DDS 34“移相全桥电路”实验挂箱	24
2.13 DDS 35“准谐振软开关电路”实验挂箱	24
2.14 DDS 37“单相正弦波 (SPWM) 逆变电路”实验挂箱	24
2.15 DT 10“直流电压、电流表”实验挂箱	28

2.16	DT 15“交流电压、电流表”实验挂箱	29
2.17	DT 16“多功能交流仪表”实验挂箱	30
2.18	DT 20、DT 21“三相可调电阻”实验挂箱	31
2.19	DT 22“三相可调电抗”实验挂箱	32
2.20	DT 23“三相可变电容”实验挂箱	33
2.21	DT 41“三相芯式变压器”实验挂箱	34
第3章 电力电子技术实验介绍		35
3.1	锯齿波同步移相触发电路实验	35
3.2	单相桥式半控整流电路实验	40
3.3	三相桥式全控整流及有源逆变电路和实验	45
3.4	三相半波可控整流电路实验	51
3.5	单相交流调压电路实验	55
3.6	三相交流调压电路实验	60
3.7	直流斩波电路(Buck 变换器)	65
3.8	直流斩波电路(Buck—Boost 变换器)	71
3.9	直流斩波电路(Boost 变换器)	76
3.10	直流斩波电路(Cuk 变换器)	90
3.11	电力晶体管(GTR)特性与驱动电路	97
3.12	功率场效应晶体管(功率 MOSFET)特性与驱动电路	113
3.13	绝缘栅双极型晶体管(IGBT)特性与驱动电路	129
3.14	单相正弦波(SPWM)逆变电路	139
3.15	单相交流斩控调压实验	144
3.16	功率因数校正电路研究实验	154
3.17	半桥、全桥开关电路变换器实验	161
3.18	移相全桥零电压开关变换电路实验	166
3.19	Buck ZCS 软开关电路实验	170
3.20	Boost ZVS 软开关电路实验	175
参考文献		181

第 1 章 电力电子技术实验概述

电力电子技术是综合了电力、电子、材料科学、计算机、通信、控制理论等知识的前沿学科，依靠电力电子器件可实现电能的高效转变与精确控制。电力电子技术是当今高新科技的重要组成部分和发展基础之一，也是新世纪发展的重要支撑技术之一，有专家学者断言，电力电子技术将成为 21 世纪应用最广泛的技术。

和其他理论不同，电力电子技术非常强调实践性。从某种程度来讲，如果不做电力电子技术实验，是无法掌握电力电子技术知识的。因此，做好电力电子技术实验是掌握电力电子技术知识的重要环节之一。

1.1 实验内容和特点

本书编排了 20 个电力电子技术实验，主要有晶闸管变流技术方面的实验 6 个；直流斩波电路(DC—DC 开关变换器)实验 5 个；电力电子器件实验 3 个；软开关电路实验 3 个；单相正弦波(SPWM)逆变电路实验、单相交流斩控调压实验、功率因数校正电路实验各 1 个。

晶闸管变流技术方面的 6 个实验属于强电实验，安全规范操作应予特别强调。“锯齿波同步移相触发电路实验”，主要是研究锯齿波同步移相触发电路的工作原理及它的适用范围。“单相桥式半控整流电路实验”，是研究晶闸管单相桥式半控整流的典型电路；它和单相桥式全控整流相比，具有操作简单、性价比高的特点。“三相桥式全控整流及有源逆变电路实验”，不仅研究了三相桥式全控整流工作原理，而且研究了三相桥式全控整流电路如何实现有源逆变的问题。“三相半波可控整流电路实验”，是研究三相桥式

可控整流电路中最基础的电路，三相桥式全控整流电路由此发展而来。“单相交流调压电路实验”，主要研究晶闸管进行交流调压时的工作原理，利用晶闸管进行单相交流调压在中小功率范围应用广泛。“三相交流调压电路实验”，是研究晶闸管在三相交流调压中的工作原理。三相交流调压电路工作原理比单相交流调压电路的工作原理复杂一些，三相交流调压电路一般应用在大功率方面。

上述这些实验的共同特点是要测量的波形较多。如：输出电压、输出电流、驱动信号、晶闸管端电压等，而且，波形变化多，每一种波形发生变化，都表示某一种工作状态发生变化。实验者实验前一定要充分预习，做到心中有数。

直流斩波电路(DC—DC 开关变换器)有 5 个实验。“Buck 变换器研究”实验和“Buck—Boost 变换器研究”实验，这两个实验电路采用的是开环工作方式；“Boost 变换器研究”实验和“Cuk 变换器研究”实验采用的是闭环工作方式；“半桥、全桥开关电路变换器实验”是将半桥、全桥开关电路变换器放在一个模块中进行研究，便于对比。

直流斩波电路类实验，相对晶闸管变流技术方面的实验来说，其输入的直流电压一般较低。晶体管工作在开关状态，一般是晶体管开关工作频率不变，通过调节晶体管开关的占空比，达到改变输出电压的目的，即“PWM”法。但晶体管工作在开关状态时，电路将产生大量高次谐波，干扰严重；高 dv/dt 、高 di/dt 的问题也很突出。因此，研究消除谐波干扰，降低高 dv/dt 、高 di/dt 的方法，也是实验者做完这类实验要掌握的基本知识。

这类电路通常处在两种工作状态：电流连续工作状态，称做 CCM 模式；电流断续工作状态，称做 DCM 模式。两种方式的输出电压计算方法不一样，注意区别。

电力电子器件是构成电力电子技术最重要的基础之一。每当有新型的电力电子器件问世，总会将电力电子技术的发展推向一个新的高峰。

本书有 3 个电力电子器件实验：电力晶体管(GTR)的特性与驱动电路的研究；功率场效应晶体管(MOSFET)特性与驱动电路的研究；绝缘栅双极型

晶体管(IGBT)特性与驱动电路的研究。这3个电力电子器件实验主要侧重于应用方面。如研究这些器件的主要技术指标、极限参数、测量方法,以及应用范围;研究它们的静态特性、动态特性,以及最匹配它们工作的各种驱动电路等。

将直流电转变成交流电称为“逆变”。逆变电路种类繁多,单相正弦波(SPWM)逆变电路是一种应用非常广泛的逆变电路。本书的“单相正弦波(SPWM)逆变电路研究”实验中,“单相正弦波(SPWM)逆变电路”属于“双极性SPWM逆变电路”。在SPWM逆变电路实验中,可以观察死区时间的变化及正弦波和三角波相交合成SPWM控制信号的情况,正弦波幅度、频率均可调节,三角波频率亦可调节。当改变幅度调制比 m_a 和频率调制比 m_f 时,可以观察到输出交流电压和纹波的变化。注意当频率调制比 m_f 是奇数或偶数时,输出交流电压纹波的大小会受到影响。

“单相交流斩控调压实验”,主要研究采用可关断器件进行交流调压。

如今,电器设备应用广泛,电磁污染也越来越严重。因此功率因数校正技术已成为近年来发展迅速的一项绿色电子技术。在本书的“功率因数校正技术研究”实验中,可以进行“有源功率因数校正研究”实验和“无源功率因数校正研究”实验。有源功率因数校正技术采用的元件多,成本高,但其技术指标较高,体积小,应用范围广。无源功率因数校正技术采用的元件少,成本低,但其技术指标较低,体积大,应用范围窄。这两种技术各有所长,应用范围各不相同。在“功率因数校正技术研究”实验中,这些特点都得以充分体现。本实验的另一特点是具有设计性、综合性。在提高题中,学生可利用元器件,在老师的指导下,自己设计、构造有源或无源功率因数校正器,充分发挥自己的创造性。当然,在做提高题时,只有课本知识是不够的,还必须阅读许多课外相关参考资料,方能开阔眼界,出色地完成实验。

当电力电子器件处在高速开关工作状态时,将产生不可忽视的开关损耗。损耗转变成热量,而且,高速开关还将产生电磁干扰。频率越高,损耗越大,器件温度越高,电磁干扰越严重。这些,都将干扰电力电子装置的安全工作。

为了减少开关损耗，人们开发了软开关技术。其基本思路基于谐振原理，即让电力电子器件在开通和关断时，高电压和大电流在时序上错位产生，避免发生重叠。因此，大大减少了开关损耗。软开关技术是目前研究的热点之一。

本书编排了3个软开关电路实验：“Buck ZCS 软开关电路实验”，主要研究“零电流软开关电路”。开关管和谐振电感 L_r 串接在一起，当谐振电容 C_r 和谐振电感 L_r 发生谐振时，电感电流为零，由于电感电流为零的状态不会突变，因此，开关管进行开通和关断时，即所谓的零电流开关。“BoostZVS 软开关电路实验”，主要研究“零电压软开关电路”。开关管 D、S 端和谐振电容 C_r 并联在一起，当谐振电容 C_r 和谐振电感 L_r 发生谐振时，谐振电容电压为零，由于电容电压为零的状态不会突变，因此，为开关管创造了零电压开通和关断的条件，即零电压开关。“移相全桥零电压开关变换电路实验”，是开关管利用本身极间电容 C_r 和输出变压器漏感 L_r 发生谐振，为开关管零电压开通和关断创造了条件。实验中，“超前臂”和“滞后臂”产生零电压的条件是不同的，而且，会发生占空比丢失的现象。同学们在做这个实验时，要注意观察研究。

1.2 实验守则

1) 实验前，应充分预习实验内容，理解实验目的，应在实验接线图上预习接线，做好实验预习报告。

2) 遵循安全第一的原则，严格遵守实验室安全操作规程。实验前，应首先弄清电源开关的位置及操作方法。发生异常情况后，应首先切断电源，保持现场，及时报告实验指导老师，等待解决。

3) 实验室内，每一组实验设备都配有固定数量的仪器、导线等。禁止未经实验指导老师同意，擅自乱拿其他组的仪器、导线。否则，将引起实验教学秩序的混乱。如果仪器或导线等发生问题，应报告实验指导老师，等待处理。

4)实验时间往往比较紧凑,同一实验组内的同学应分工明确、紧密配合、高效利用时间。实验数据、图表应保管好。

5)遵守实验时间,不得迟到早退,实验过程中,不得随意离开。要保持实验室安静、整洁。实验完毕,要整理好仪器,拆除导线放回原处。经实验指导老师同意后,方可离开。

1.3 实验方法及注意事项

1)实验指导老师首先要详细介绍实验装置和测试仪器的各项功能和操作方法。有些复杂的仪器设备,老师有必要作操作演示,以便同学尽快掌握其使用方法。同时,老师也应将本次实验的要点和注意事项加以强调,以便提高实验效率。

2)学生上交实验预习报告后,经实验指导老师同意,方可开始实验。

3)实验开始后,学生应严格按照实验教材的内容和实验步骤,循序渐进地进行实验。

4)应在断电的状态下连接导线。禁止带电插拔导线。否则,稍有不慎,将发生人身安全或设备损坏的重大事故。同时,这也是同学们必须养成的安全、良好的工作习惯。

5)一般来说,主电路和控制回路应分别各自搭接,当控制回路搭接完毕后,应测试其控制功能,如有无控制信号,控制信号脉冲的幅度和相位是否正确等。若功能正常,即可和主电路连接在一起。

6)实验系统接线完毕后,一定要进行自查。组内同学应轮流反复核对。待确认无误后,再经实验指导老师检查,方可通电实验。

7)示波器电源输入端一般要接隔离变压器。双踪示波器两个探头的接“地”点是连通的。因此,在测量两个不同的波形时,要求一只探头的接地夹接“地”,另一只探头的接地夹悬空不接。以保证两个探头的“地”是共同的一点。当然,没有共同点的两个波形是不能同时测量的。这点要特别注意,否则,将发生损坏设备的情况。

8) 实验中得到的数据和波形图, 有时会 and 理论有较大差别。应该实事求是予以记录, 不得故意向理论靠拢。当得出的数据和图形与理论有很大的出入时, 应当仔细分析、查找原因, 或重做实验, 或及时报告实验指导老师, 请求指导。

9) 实验中, 常常会出现一些异常故障。比如, 接线全对, 实验就是无法运转等。此时, 切忌情绪急躁, 应当静下心来, 运用所学知识, 一步一步仔细分析故障现象, 耐心查找故障原因, 直到找到故障点。

10) 两人以上合作进行的实验, 每人都要分工明确。但是一定要经常互换角色, 以期每位同学都得到均衡锻炼。

1.4 实验总结

完成实验之后, 应对实验数据、图表进行认真的整理和绘制并分析、讨论实验现象。每位同学都必须独立完成各自的实验报告。实验报告是以文字的形式对实验进行全面的总结。一定要做到书写认真、图表清晰、数据真实。同组实验人员的实验数据可以共享, 但实验报告不可雷同。

实验报告一般为如下格式:

1) 实验课程名称, 实验项目名称, 实验学生专业、班级、姓名、学号、同组者姓名, 实验时间、地点及实验指导老师姓名。

2) 实验目的, 实验原理, 实验内容, 实验线路图等。

3) 记录实验设备、仪器、仪表的型号、规格、铭牌数据及实验装置编号等。

4) 根据实验教材的要求, 完成表格的填写, 绘制波形图、曲线图, 计算处理实验数据, 用理论阐述实验结果, 得出明确结论。

5) 对实验中出现的现象、遇到的问题进行深入分析, 写出心得体会, 可对实验提出自己的看法及改进意见。

第 2 章 DDSX 01 型电力电子技术实验系统简介

本章主要介绍 DDSX 01 型电力电子技术实验系统和各 DDS 型实验挂箱面板的设置、实验功能。

2.1 DDSX 01 型电力电子技术实验系统概述

DDSX 01 型电力电子技术实验系统是新一代综合性的实验系统。本实验系统采用挂箱式结构；各个不同内容的单元实验电路板，都做成模块式挂箱，可根据实验的需要，自由组合。故结构紧凑，使用方便。

本实验系统设有完备的安全保护功能，把安全操作和保护放在首位。各种功能齐全的防护措施能确保学生、教师的安全及设备的正常操作。

本实验系统的控制屏经过精心设计，各种开关、指示灯、仪表布局合理，图文指示简捷明了；实验台宽阔实用，配有机箱和抽屉，并且装有滚轮，移动方便。电路接线采用接插线方式，实验者可方便舒适地进行操作。

对于电力电子器件、电力电子电路的四类变换形式均有典型电路实验内容，并根据电力电子技术的发展和电力电子技术有关教学内容的更新，安排了新的实验内容。在实验模块设计中，为学生提供了自主设计的空间。

模块挂箱内的实验电路板，最大限度地采用了集成电路，尽可能少地采用分立元件，故可靠性和一致性较高。实验系统的背面开门，可使维修保养方便快捷。

1. 技术参数

1) 输入电压：三相四线， $380\text{V} \pm 10\%$ ， $50\text{Hz} \pm 1\%$

2) 装置容量: $< 1\text{kVA}$

3) 外型尺寸: 长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $= 1.8\text{m} \times 0.72\text{m} \times 1.6\text{m}$

4) 工作环境条件: 环境温度范围为 $-5^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$; 相对湿度 $< 75\%$ (25°C);

海拔 $< 1000\text{m}$

2. 参考实验项目

- 1) 锯齿波同步移相触发电路实验
- 2) 单相桥式半控整流电路实验
- 3) 单相交流调压触发电路实验
- 4) 三相交流调压电路实验
- 5) 三相半波可控整流电路实验
- 6) 三相桥式全控整流及有源逆变电路实验
- 7) 电力晶体管 (GTR) 特性与驱动电路实验
- 8) 功率场效应晶体管 (MOSFET) 特性与驱动电路实验
- 9) 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 特性与驱动电路实验
- 10) 直流斩波电路 (Buck 变换器) 实验
- 11) 直流斩波电路 (Buck—Boost 变换器) 实验
- 12) 直流斩波电路 (Boost 变换器) 实验
- 13) 直流斩波电路 (Cuk 变换器) 实验
- 14) 单相正弦波 (SPWM) 逆变电路实验
- 15) 单相交流斩控调压实验
- 16) 半桥、全桥开关电路变换器实验
- 17) 功率因数校正电路实验
- 18) 移相全桥零电压开关变换电路实验
- 19) Buck ZCS 软开关电路实验
- 20) Boost ZVS 软开关电路实验

2.2 DDSX 01 型“电源控制屏”简介

DDSX 01“电源控制屏”固定于实验系统正面。其面板如图 2-1 所示。

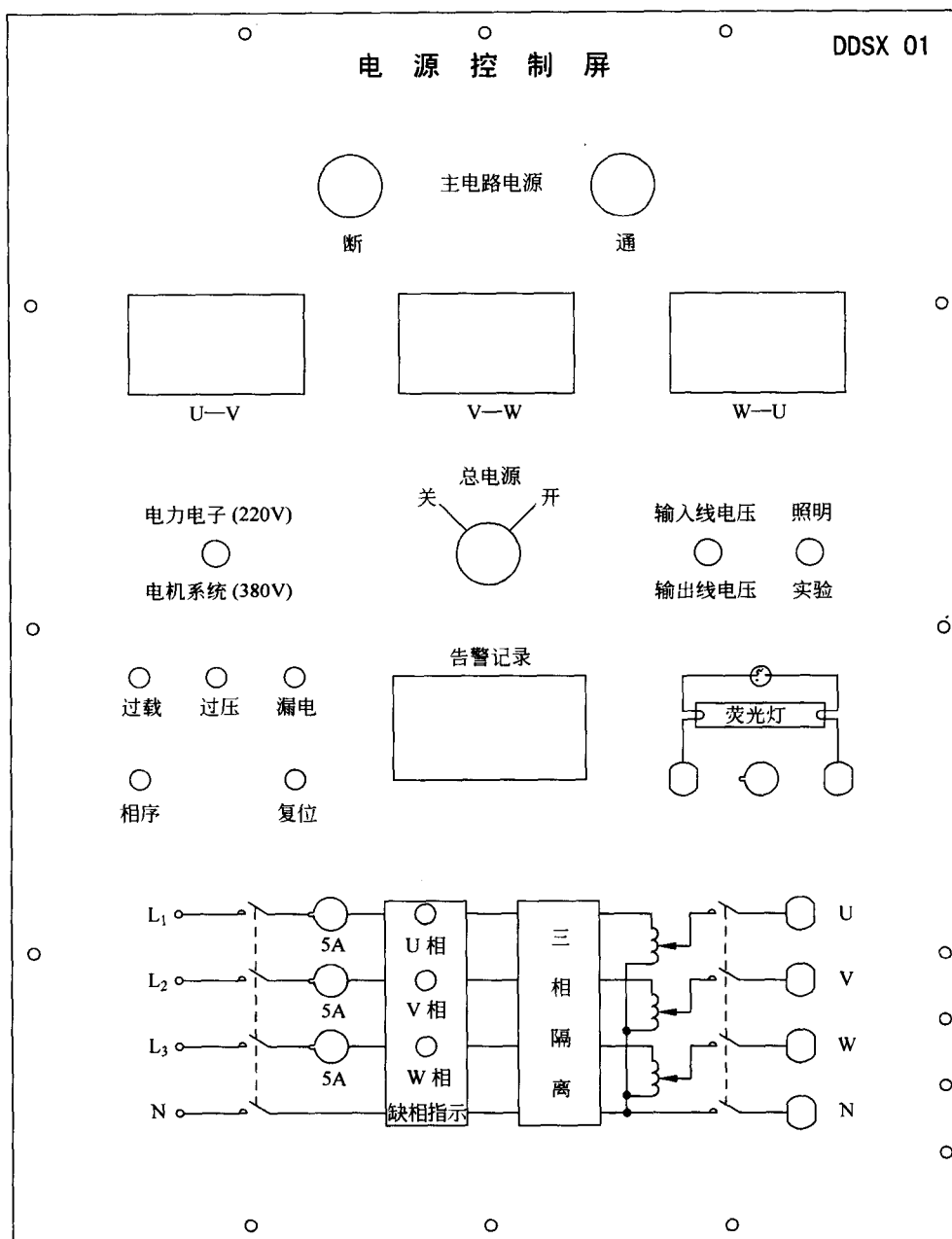


图 2-1 DDSX 01“电源控制屏”面板图

该控制屏内设有总电源开关,由钥匙控制开或关。三只交流电压表分别显示 a、b、c 三相电压数值。电压表右下方的拨动开关可选择显示“输入线电压”或“输出线电压”的电压数值;电压表左下方的拨动开关可选择“电力电子(220V)”或“电机系统(380V)”。当然,这些输入电压仍可通过调压器进行调压。

当实验系统发生过载、过压、漏电等故障时,相关报警指示灯立即闪亮,提示采取相应措施;待故障排除后,按复位按钮,使其复位。

当三相电源相序发生错误时,相关相序报警指示灯立即闪亮,待故障排除后,相序报警指示灯会自动熄灭。

实验系统发生故障后,报警的次数会自动记录并显示在“告警记录”显示屏上。三相电源经 1:1 隔离变压器输入,三相缺相指示灯指示有无缺相发生,若发生缺相则相应指示灯不亮。正常情况下,三只指示灯均闪亮。经隔离变压器输入的三相电源,通过一只三相调压器(在控制屏左侧,不在面板上),可调节输出电压的大小。输出电压经 U、V、W、N 端口输出。

2.3 DDS 02 “一、二组桥晶闸管电路”实验挂箱

DDS 02“一、二组桥晶闸管电路”实验挂箱面板如图 2-2 所示。

DDS 02 实验挂箱主要承担晶闸管变流技术项目。该实验挂箱配置了 12 只晶闸管、6 只整流二极管。其中 6 只晶闸管已按 2 只一组串接排列成三列,可以很方便地接成单、三相全控桥接法;另 6 只晶闸管则各自独立分散,可以按需要自由组合成各种电路。实验挂箱内还配置有一个续流二极管;一个“RC”阻容吸收电路,用以吸收浪涌电压,保护主电路晶闸管;一个有 5 个选择挡位的 1200mH 的电感;一只专用电缆接口,用以连接 DDS 03 实验挂箱内的晶闸管触发信号。此外,还有 12 只发光二极管指示灯,分别指示两组触发脉冲的有无;另有 12 只发光二极管指示灯,分别指示两组熔断丝的通断情况。其使用一目了然,非常方便。