电气信息学科创新人才培养系列
电工电子实验教学规划示范教材

信号与控制综合实验教程

◎ 熊 蕊 编著

创新实践教学与人才培养模式的探索

華中科技大學出版社
http://www.hustp.com

电气信息学科创新人才培养系列
电工电子实验教学规划示范教材

信号与控制综合实验教程

华中科技大学出版社
http://www.hustp.com
中国·武汉

内容简介

本书以“原理＋任务＋引导”的形式，介绍了电气工程学科技术基础课程的综合实验的基本理论、实验设计和实验方法，以及精选的52个由浅入深的实验内容，作为有关实验课程及综合应用的教学指导。

全书内容包括三大部分：“绪论”以实验指南的形式，进行实验的意义、自主实验中实验的选择、实验的方法(规范)、如何写实验报告、自我评价以及团队合作等引导；“基础实验篇”分述信号与系统、自动控制理论、检测技术和电力电子学等四门课程的基础实验内容和要求；“综合实验和设计篇”为该四门课程之间按照内在逻辑联系进行的综合性实验内容，针对给定课题，引导学生学会设计和研究的方法，根据实验条件去实现设计。每部分后附有学生日志，引导学生记录思考的问题和解决方案，养成自主学习、主动实践和求索的习惯。

本书可作为电气工程及相关学科的本科生实验教材，以及相关课程设计的教材，也可作为相关专业研究生的实验教材。

图书在版编目(CIP)数据

信号与控制综合实验教程/熊　蕊　编著. —武汉：华中科技大学出版社，2010.11
ISBN 978-7-5609-6611-3

Ⅰ.信…　Ⅱ.熊…　Ⅲ.①信号系统-实验-高等学校-教材　②自动控制系统-实验-高等学校-教材　Ⅳ.①TN911.6-33　②TP273-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第193512号

信号与控制综合实验教程　　熊　蕊　编著

策划编辑：刘万飞
责任编辑：刘万飞
封面设计：刘　卉
责任校对：朱　霞
责任监印：熊庆玉
出版发行：华中科技大学出版社(中国·武汉)
武昌喻家山　　邮编：430074　　电话：(027)87557437
录　　排：武汉佳年华科技有限公司
印　　刷：华中科技大学印刷厂
开　　本：787mm×1092mm　1/16
印　　张：20　插页：5
字　　数：540千字
版　　次：2010年11月第1版第1次印刷
定　　价：38.00元

本书若有印装质量问题，请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线：400-6679-118　竭诚为您服务
版权所有　侵权必究

序

大学中的课程递进关系有一个特点：逐渐将孤立的、单一的知识点融合成为具有综合知识体系、多学科应用方向的新知识点，这些逐渐延伸到学生毕业的新知识点，目标是要引导大学生去学会应用、学会思考、学会学习、学会创造。

20世纪以来，学科在分工越来越细、研究越来越专业化的同时，交叉渗透和综合化趋势也日益明显。高等教育要实现培养人才与社会所需人才标准的统一，才能适应社会发展需求。经过多次教学改革形成的课程体系，有了更多的彼此之间的联系和应用，以及更多面向学科前沿研究和技术的延伸介绍，学生的视野被大大扩展。但相关实验内容如果仍隶属于原课程，则始终受到该课程单元知识的限制，难以实现综合设计及应用、创新等目标。

“信号与控制综合实验”正是基于这样的理念进行改革的综合实验。它依据电气学科课程中学科理论体系的递进关系，由四门学科基础课程——信号与系统、自动控制理论、检测技术和电力电子学的基本实验和彼此间的综合应用实验构成，并通过引导性内容将学生引向自行命题的设计、应用、创新实验。视应用的不同，这些实验又可延伸到其他的专业课程，如DSP原理及应用、计算机控制、电磁兼容原理及应用、电机拖动及控制，等等。

本书力图体现电气工程学科基础实验内容的一种合理结构：以信号传输和分析为线索、以自动控制理论为理论体系、以传感器为检测元件或装置、以电力电子电路或电机为对象形成自动控制系统。

本书以“原理＋任务＋引导”的形式，按照学生对科学的自然认知进程，由浅入深地设置了52个实验，全书内容包括引导和实验共三个层次：“绪论”以实验指南的方式介绍实验意义、实验选择、实验方法、实验报告（预习和总结）、团队合作等；“基础实验篇”为四个部分，分述四门课程的基础实验内容和要求，引导学生在实验前、实验中和实验后不断思考和设计，获得自主学习、合作交流、认识并解决问题、分析总结等能力；“综合实验和设计篇”，分述这四门课程之间按照内在逻辑联系进行的综合和设计性实验内容，引导学生学会设计和研究、实现的方法。

“信号与控制综合实验”超越了各课程之间的界限，使得学生的实验活动可以不受课程体系和实验室约束，便于学生实现综合设计及应用、创新等目标。

本书在原理描述基础上，给出粗线条的任务，方案和步骤由学生自行拟定，可不受实验装置约束。它对实验者预习方面要求比较高（至少要熟习掌握实验原理、选择好实验，并拟定好实验方案后才能搭建实验电路）。部分实验给出了实验

示例，它们或是设计举例，或是实验步骤、接线指导，或是实验应注意的问题，适合不同层次和有不同兴趣、特长的学生。实验示例仅是参考，希望实验者按照实验原理和实验设计及方法自行完成设计过程。

使用者可以按照教学要求或自己的兴趣，选择其中部分实验内容。

每个基本实验后附有学生日志，引导学生记录实验前和实验中思考的问题、解决方案，利于学生养成自主学习、主动实践和求索的习惯。

本书由熊蕊教授撰写，并在以下各有关单位和个人的协作和帮助下完成。

武汉新瑞科电气技术有限公司和华中电气自动化公司参加了实验内容的硬件设计、研制工作，袁尚志和何定桥工程师在本教程编写中亦给于了鼎力协助。

本书中部分实验课题源于新加坡斯比泰电子有限公司和华中科技大学联合主办的“斯比泰杯电气与控制(电力电子与电力传动方向)设计竞赛”的竞赛课题，并由获奖学生完成实验建设。

华中科技大学陈坚教授在百忙之中为本书实验内容审定建设方案，并奉献了他多年的科研和教学成果；何俊佳教授、李红斌教授、张蓉老师、李军老师、邓春花老师，以及研究生王科、王志、李勋楠、刘静、李扶中、胡旭、裴乐、杨帆、陈没、胡小磊、马智泉、孙友涛等，在实验室建设和本书编写中也付出了艰辛的努力。

本书及实验内容建设获得华中科技大学“教学质量工程”精品教材项目和实验室建设项目的经费资助。

本书中部分素材取自杭州“天煌教仪”、浙江大学仪器系检测技术研究所和杭州三鑫友和科技有限公司友情提供的实验指导书。

所有以上这些支持，确保了本书及实验教学改革工作的顺利完成，在此由衷地表示感谢。

顺应时代进步的需求、培养具有创新精神的人才所进行的教学改革，是一项重大的工程。这里完成的只是一个初步的尝试，效果应由教学实践予以检验。恳切希望使用本书的教师和同学们，在实践中将意见及时反馈给我们，使之不断改进和完善。

编　者

2010 年 8 月于华中科技大学

目录 Content

绪　论

1　实验的意义 …… (1)
2　如何选择实验内容 …… (2)
3　如何开始一个设计性实验 …… (7)
4　如何做研究 …… (11)
5　如何写实验设计方案和预习报告 …… (14)
6　如何写实验报告 …… (15)
7　关于团队合作 …… (19)

第一篇　基本实验

第一部分　信号与系统基本实验 …… (27)
实验一　常用信号的观察 …… (28)
实验二　零输入响应、零状态响应及完全响应 …… (29)
实验三　非正弦周期信号的分解与合成 …… (31)
实验四　信号的无失真传输 …… (34)
实验五　无源滤波器与有源滤波器 …… (36)
实验六　LPF、HPF、BPF、BEF 间的变换 …… (39)
实验七　信号的采样与恢复 …… (42)
实验八　调制与解调 …… (45)
实验九　信号的产生、采集、处理、变换和基于 Matlab 的分析(测量与计算机分析实验) …… (49)
第二部分　自动控制理论基本实验 …… (57)
实验十　控制系统传递函数中典型环节的模拟 …… (58)
实验十一　二阶系统的模拟与动态性能研究 …… (63)
实验十二　二阶系统的稳态性能研究 …… (65)
实验十三　三阶系统的模拟与研究 …… (69)
实验十四　线性控制系统的设计与校正 …… (72)
实验十五　系统能控性与能观测性分析 …… (82)
实验十六　控制系统状态反馈控制器设计 …… (84)
实验十七　基于内模原理的状态反馈控制(提高性内容) …… (90)
实验十八　状态观测器及其应用 …… (94)
第三部分　检测技术基本实验 …… (101)
实验十九　霍尔式传感器的直流激励特性 …… (102)

实验二十　应变式传感器的研究……（104）
实验二十一　温度传感器测温实验……（107）
实验二十二　差动变压器的标定……（110）
实验二十三　超声波传感器距离测量……（113）
实验二十四　PT100 铂热电阻测温实验 ……（115）
实验二十五　光电传感器的应用——光电转速测试……（117）
实验二十六　电涡流传感器电动机测速实验……（118）
实验二十七　传感器应用自主实验(提高性内容)……（119）
第四部分　电力电子学基本实验……（123）
实验二十八　PWM 信号的生成和 PWM 控制的实现 ……（124）
实验二十九　DC/DC—PWM 升压、降压变换电路性能研究 ……（132）
实验三十　三相桥式相控整流电路性能研究……（135）
实验三十一　DC/AC 单相桥式 SPWM 逆变电路性能研究 ……（140）

第二篇　综合实验

实验三十二　典型环节和控制系统频率特性的测量及基于 Matlab 的分析 ……（154）
实验三十三　电动机速度开环控制和闭环控制……（158）
实验三十四　温度控制系统的开环控制和闭环控制……（161）
实验三十五　DC/DC PWM 升降压变换电路(cuk 变换器)设计 ……（164）
实验三十六　电力电子电路闭环控制(稳态分析)……（170）
实验三十七　电压传感器、电流传感器及应用 ……（181）
实验三十八　移相全桥零电压开关电路实验……（188）
实验三十九　信号的调制——SPWM 信号的产生与实现 ……（194）
实验四十　电力电子电路中信号的频谱分析……（200）
实验四十一　电力电子电路功率因数分析……（204）
实验四十二　电力电子电路滤波器设计……（209）
实验四十三　谐波和功率因数分析及改善……（221）
实验四十四　光耦器件及其他隔离检测器件的应用……（223）
实验四十五　带功率因数校正的整流电路设计及研究……（231）
实验四十六　谐振软开关电路实验……（250）
实验四十七　电力电子电路闭环动态特性观察及超调量抑制……（257）
实验四十八　DC/DC 单端反激式变换电路设计实验 ……（261）
实验四十九　DC/DC 单端正激式变换电路设计实验 ……（272）
实验五十　DC/DC 变换器应用——直流电动机速度控制 ……（278）
实验五十一　DC/AC SPWM 单相全桥逆变电路设计及研究……（282）
实验五十二　SPWM 变频调速电路实验 ……（285）
附录 1　DLDZ 电力电子教学实验台(综合实验台)简介 ……（295）
附录 2　信号与系统基本实验电路板原理图 ……（300）
附录 3　电力电子实验装置挂箱 A 示意图……（306）
附录 4　电力电子学基本实验和实验电路板原理图 ……（310）
参考文献……（313）

绪　论

1　实验的意义

1.1　实验的意义

实验首先源于对理论正确性的验证，而后发展到对未知科学研究的探索。

1956 年，杨振宁和李政道首次提出了“宇称不守恒定律”，被称为“物理女王”的美籍华裔物理学家吴健雄(1912—1997)，为了证明杨振宁、李政道理论的正确性，几乎整天钻在实验室里，每天睡眠只有 4 个小时，最终证明了杨振宁、李政道理论是正确的，从而推翻了长期以来被人们奉为金科玉律的“宇称守恒定律”。尽管杨振宁和李政道因此站到了诺贝尔物理学奖的领奖台上，但毋庸置疑，是吴健雄解开了原子物理和核物理的第一号谜底。吴健雄在原子光谱、量子力学等方面还完成了许多意义重大的实验，获得了一系列荣誉。

与此类似，世界上很多理论，都是通过了实验验证，才能继续往前发展。人类的许多猜想，如飞行器、机器人、太空行走等，都是先完成设想，周密设计，进行各种小试验后再逐步实现的。这样的验证性实验已经融入了周密设计的元素，也是高校教学中的设计性实验由来。

今天的实验，由验证、设计、综合、创新等融合在一起，不像当年牛顿在苹果树下发现万有引力那样偶然和孤立，需要团队的合作交流，需要凝聚集体的智慧和力量。

1.2　高校实验教学的目的

高校的实验除了具有“对理论正确性的验证”和“对未知的科学研究的探索”两种功能外，还有另一个功能，即通过实验训练对学生进行能力的培养。

目前，华盛顿协议签约成员的专业教育认证标准，均采用“能力导向”的基本原则，即将接受教育的人员的素质和潜在技能表现作为衡量教学成果的评价依据，并以促进其持续改进作为认证的最终目标。

那么，“能力导向”中的能力是哪些呢？高校中实验教学的目的何在？

ABET（美国工程技术认证委员会）2002 年研讨会上提出，通过实验室实验，学生应该能够获得以下 13 种能力：instrumentation（使用仪器）、models（建模）、experiment（完成实验）、data analysis（数据分析和处理）、design（设计）、learn from failure（从失败中学习）、creativity（创造）、psychomotor（智能操作）、safety（安全操作）、communication（交流）、teamwork（团队合作）、ethics in the lab（具备实验室道德规范）和 sensory awareness（感性认识）。

因而，实验教学的目的就是以培养这 13 种能力为原则，引导学生利用多种现代实验手段、

方法和工具对实验现象和结果进行深入分析研究，在实验（包括验证性实验、设计性实验和创新性实验）中学会学习和研究（而不仅仅是动手而不动脑的操作），注重对学生探索精神、科学思维、实践能力、创新能力和合作交流能力的培养，引导学生逐步进行自主学习。

事实证明，要获得以上的能力，绝不是单纯理论学习能完成的，实验学习同样重要。

1.3 验证性实验

对理论或猜想的验证，是验证性实验的最初目的。现在，高校实验教学中的验证性实验，已经超出了验证理论的初衷。学生通过验证性实验，认识各种实验仪器设备及其功能、测量范围和测量原理，寻找知识点之间的联系，规划实验布局以便能将理论尽可能好地重现，学会与同学合作、交流并发现他人的长处，学会用所学知识分析处理实验数据，学会从实验结果中发现问题并提出解决和完善的途径等，从而获得锻炼和提高能力。

1.4 设计性实验

通过实验研究系统，需要建模——用模型描述系统的因果关系或相互关系。系统建模可以对实际系统进行分析和设计，预测或预报某些状态的发展趋势，从而对实际系统实行最优控制。

把理论模型（理论和公式）变成实验实施的模型，是实验设计的重要环节。这需要对系统本身的理论知识、实验实施环境和需要得到的结果等方面更详细地了解和设计，也就是需要对实验模型进行简化、替代、取舍、估算及测量布局。

在实验设计中，需要综合应用各种仪器、各种对象和各种知识，而知识面本身涉及范围越宽，综合应用的余地就越大，实验就越复杂，也就越有可能出成果。

所以，设计性实验经常与综合、应用和创新等联系在一起。学生可从中体会到所学知识一个一个回到自己脑中和手中的乐趣，体会到枯燥的公式变成现实和成果的乐趣，从而激起“创造”的激情。

祝愿使用本书的大学生们，通过自主学习和自主实践活动，学会学习，为自己创造有意义的学习经历。

2 如何选择实验内容

在开放自主实验中，很多学生面对众多的实验内容往往不知如何选择是好——既要选择满足一定学分的实验内容，还要能确保实验顺利完成，而且要从中获得有意义的学习经历。

选择实验内容确实非常关键，选择适合自己特点和目标的实验内容，可为实验的成功奠定稳固的基础。

那么，如何选择实验内容呢？可以从以下几个方面考虑。

2.1 分层次或难易程度选择

实验都是有不同层次的，就像考试中的考题有难易一样。它们按照所需完成的时间分为不同的学分和分数权重，也就是通常理解中的难易。

学生们可以选择一个大的实验项目(需要花很长的实验和设计时间),也可以选择数个小实验项目(每个实验所花的时间不多),来选满规定的学分。

选择时要充分了解自己的特点和特长,充分了解这些实验内容,而不是到了实验室再翻开书本去了解。

根据实验层次进行选择,应考虑以下几个方面。

首先,应选择个人感兴趣、擅长或是可以发挥自身潜能的实验。例如,采用计算机实现控制的一类实验,适合编程高手和数字电路分析设计熟练者;控制性能研究一类实验,则适合比较熟练掌握自动控制理论的学生。

其次,为了弄清理论课程的内容,必须选择相应的设计实验。例如,选择"线性控制系统的设计与校正"实验,可以在设计中加深对自动控制理论的认知。这相当于更深入的考前复习,对考试也是有好处的。

最后,鉴于很多实验内容彼此都是有联系的,应选择多个基础性实验内容,逐步积累知识,以便最终能完成一个较大的综合设计类实验。例如,"控制系统闭环特性分析"实验,先要用到开环的实验分析找到问题,然后要用到传感器知识才能实施闭环。如果对象是电力电子电路,还有频谱分析、功率因数分析和滤波的问题,可以选择这样的一系列基础实验:开环控制实验、传感器实验、谐波和功率因数分析实验、滤波器设计实验等。这些逐步加深每一个知识点的基础实验,能使选择的实验内容具有体系性,基本的知识点都能熟练掌握,对将来做研发工作比较有帮助。

无论选择哪些实验内容,选择时请首先对自己提出三类问题。

(1) 这个实验是做什么的?做这个实验有什么意义?它是想说明一个什么问题?解决什么问题?这类问题的回答,必须基于对实验内容的充分了解。

(2) 这个实验利用了哪些原理?它大概要用到哪些公式和实验仪器?我自己了解吗?不了解怎么办?这类问题的回答,必须基于对理论、实验仪器和测量原理的了解。

(3) 还有没有其他的方法?这类问题可促使自己寻找更简单、更方便、更精确的实验方法。

上述几个问题,是原谷歌副总裁李开复先生给中国的年轻人讲创新时的提示,非常有用,建议同学们试试。

如果回答都是肯定的,说明你的强项在此;否则,说明你的弱项在此。而你如果想通过这个实验去攻克这个弱项,则这个实验就是值得选择的。下一个回答一定是:"让我来试试看!"

如果上述问题的回答都是否定的或不确定的,那说明你并不了解这个实验,或者根本就没有兴趣,你可以再次审视自己的特长,去选择其他实验。

如果你甚至完全不想去回答这些问题,则说明也许你不适合做实验而只适合考试回答问题,那也没有关系,可以选择操作比较简单的,或者已有附录供你参考的,你将就一下把学分选满了——记住,实验操作可以简单、一步一步按照附录中的指导去验证,但是思想不能简单,对于实验中出现的问题或实验结果,你仍然应思考以下两个问题。

(1) 这个实验本意是要解决什么问题(达到什么目标)?

(2) 我的实验结果达到目标了吗?达到了,吻合的百分比是多少?为什么有误差?误差是怎样产生的?如果没有达到,为什么?有没有改进的方法?

能够这样思考和回答问题的学生,能力也是优秀的。

无论你的特长如何，请坚持这样去做。

2.2 分系统或专题选择

若干个实验之间的联系，使它们具有系统性，如果将它们作为一组实验去选择，由浅入深地研究实验所说明的问题，则可以将所选的实验合成一个专题研究。例如，你可以选择如下这样一组实验内容。

基本实验中的一阶和二阶系统分析——了解诸如电机的建模和用实验测取时间常数、控制系统的性能研究等问题。

控制系统的设计校正实验——了解设计中的知识点。

传感器的应用实验——为了实施闭环的需要选择和研究传感器及其特性。

控制系统的开环和闭环控制——学会看懂较复杂的电路图，使用电路板完成功率电路和控制的实验。

电机的开环和闭环控制——将以上实验结果和分析研究应用到电机控制中。

最后的这个应用实验，几乎不再需要很多的时间，一切都顺理成章地综合进来，因为基本的知识点已经出现在前面的实验中了。

另一个非常具有系统性的实验系列是“谐波和功率因数研究及其治理”，这是电气工程专业学生必须要了解的内容。与此相关的实验内容很多。这里摘录了一个学生实验报告中对其如何选择实验所写的一段说明。之所以摘录学生报告的内容而不是以教材作者身份加以说教，是因为这个学生的实验选择思路已经非常清晰，把实验选择的意义阐述得如此完美。

以下是摘录的内容（综合实验（二）报告，大三下学期）

一、所选实验

实验 A　电力电子电路中信号的频谱分析

实验 B　电力电子电路中功率因数分析

实验 C　谐波和功率因数分析与校正

实验 D　带功率因数校正（PFC）的整流电路设计与研究

二、选择依据

1. 整体思路

首先，我想说明的是为什么我会选择这组实验。经过实验辅导课，我确定了自己的想法。如果单纯为了凑够 60 个学分而胡乱选两个实验充数，完全是浪费了这次宝贵的学习机会。所以，我想选择一组具有整体意义的实验，由浅入深地完成发现问题、分析问题、解决问题的过程，从而加深对某方面知识的学习理解。

于是最终确定了上述这组实验，可以发现我是围绕着“谐波分析与治理、功率因数分析与校正”这条以“减小电网谐波污染、提高供电质量”为目的的主线来组织自己的实验的。

首先，学习 WaveStar 工具软件的使用，进行信号的频谱、功率因数分析。

其次，对谐波和功率因数进行校正，探索研究新的校正方法。

再次，探索新的实验线路，在新的实验线路上验证新的校正方法。实验条件不允许的话，用 Matlab 等其他软件进行仿真。

最后，深入研究带功率因数校正（PFC）的整流电路。

此外，学习研究谐波治理的其他方法，完成创新部分。

2. 应用背景

选择这组实验是从实际应用出发，具有实际应用背景的。

我们知道，谐波是有害的，有什么危害呢？这些谐波又都是哪里来的呢？功率因数低也显然是我们不希望的，它又有什么危害呢？

通过查阅相关资料，关于这几个疑问，我总结了以下几点。

首先，谐波是一种污染。

(1) 谐波使电气设备与电子设备及自动化系统等用电环境恶化，并对周围的通信系统甚至配电系统以外的设备造成危害。谐波干扰是电能质量问题中最严重的。楼宇中大量电力电子装置在使用中产生的谐波电流如果不加治理直接注入电网，将使供电变压器低压侧谐波电压升高，低压侧负载由于相互干扰而无法正常工作。

(2) 谐波电压通过供电变压器传递到高压侧从而干扰其他用户。近年来，各种开关电源、不间断电源用量越来越大，使得配电系统的谐波污染日益严重，由谐波引起的各类事故和故障不断发生，对国民经济和生产、生活造成了不必要的损失。

其次，电网谐波主要来自于3个方面：发电源质量不高产生谐波；输配电系统产生谐波，主要是电力变压器产生谐波；用电设备产生的谐波。这些谐波主要由晶闸管整流设备和变频装置产生，详述如下。

晶闸管整流在许多方面得到了越来越广泛的应用，给电网造成了大量的谐波。如果整流装置为单相整流电路，在接感性负载时，则含有奇数次谐波电流，其中3次谐波的含量可达基波的30%；在接容性负载时，则含有奇数次谐波电压，其谐波含量随电容值的增大而增大。如果整流装置为三相全控桥6脉冲整流器，变压器原边及供电线路则含有5次及以上奇数次谐波电流；如果整流装置是12脉冲整流器，也还有11次及以上奇数次谐波电流。经统计表明，由整流装置产生的谐波占所有谐波的近40%，这是最大的谐波源。

变频装置由于采用了相位控制，谐波成分很复杂，除含有整数次谐波外，还含有分数次谐波。很多具有调压整流装置且有线圈结构的家用电器等，虽然功率较小，但数量巨大，也是谐波的主要来源之一。

再有，功率因数低会降低供电质量。

无功功率的增大，会导致电流的增大和视在功率的增大，从而使发电机、变压器及其他电气设备和导线容量增大，使电力设备的启动及控制、测量仪表的尺寸和规格也要相应加大。同时会使设备及线路的损耗增大，线路及变压器的电压降增大。如果是冲击性的无功功率负载，还会使电压产生剧烈波动，供电质量严重下降。有功功率的波动一般对电网电压的影响较小，电网电压的波动主要是由无功功率的波动引起的。

功率因数低不仅浪费能源，增加损耗，还存在火灾隐患。提高功率因数能更充分地利用电源设备的容量。

3. 解决问题的方法

抑制谐波的方法有两种：一种是设计谐波补偿装置来补偿谐波，这对各种谐波源都适用；另一种是对电力电子装置本身进行改造，使其不产生谐波，且功率因数接近为1。传统的谐波补偿方式采用由LC组成的无源滤波器(passive power filter)，它由滤波电容器、电抗器和电阻器适当组合而成。它具有结构简单、前期投资少、运行可靠性高、运行费用低等优点，因而得到广泛的应用。但是，LC滤波器存在一些难以解决的问题，具体如下。

(1) 只对设计要求规定频率点的谐波滤波效果较好，对其他频率谐波滤波效果不明显。

(2) 负载谐波电流过大时，可能造成无源滤波器过载，损坏滤波器，造成事故。

(3) 无源滤波器的滤波效果与系统的运行状况相关，当电网系统阻抗和频率变化时，难以保证滤波效果。

(4) 特殊的谐波或系统阻抗和频率变化，可能与电网阻抗发生串联谐振或并联谐振现象，造成电压波形畸变和谐波电流放大，引起无源滤波器过压过流，甚至损坏，影响电网的稳定性。

近年来，有源电力滤波器取得了长足的发展，被认为是治理电网谐波最有前途的方法。有源电力滤波器的基本原理是检测出补偿对象中谐波电流的大小，由有源电力滤波器产生一个与谐波电流大小相等、极性相反的补偿电流抵消谐波电流，使电网电流只含基波分量。与无源电力滤波器相比，有源电力滤波器能对变化的电网谐波进行动态跟踪补偿，补偿特性受电网阻抗变化影响小，不存在谐波放大的危险，储能元件容量小。

三、实验过程

1. 任务和目标

在这一组试验中，我主要以晶闸管相控整流电路为研究对象，分析谐波及功率因数的问题。因为无论是在产生谐波还是功率因数问题上，晶闸管相控整流电路都非常具有典型性。

2. 总体方案设计

原理分析

……

设计特点

将实验 A、实验 B 一次完成，辅助以 WaveStar 工具软件的强大分析功能，在学习工具软件使用的同时，完成对谐波、功率因数的分析。

配合实验 C 进行电力电子电路滤波器的设计，利用双向触发二极管和双向晶闸管等元件构成的台灯调光电路，实现谐波和功率因数的初步改善。

最后完成实验 D，研究带 PFC 的整流电路设计及研究。

选择依据和确定

……

3. 方案实现和具体设计(过程)

4. 实验设计与实验结果

5. 结果分析与讨论

四、研究、创新部分

1. 现有方案的局限

2. 创新的目标和依据

3. 创新方案设计

4. 方案实施与结果分析

五、出现问题及分析、解决

……

以上实验选择说明和实验方案，引自华中科技大学 2006 级本科生 A 的实验报告，征得本人同意后摘录于此。该实验报告的思路和方案，对如何选择实验做了很好的诠释，希望读者能从中有所收获。它也说明了一个事实：在“以学习者为中心”的学习中，教师与学生们共同学习

着，大多数学生都可以成为这样的“教育”者。

试试作出你的选择。

3 如何开始一个设计性实验

综合性、设计性实验是能巩固理论知识、提高设计能力和科研能力的最好锻炼方式之一。由于这样的实验已经完全不是简单的操作认知，而是应用、开发、创新的过程，内容和思路都可以不受约束。实验步骤和实验方案通常要根据实验内容自行拟定。

所有层次的实验中，都会有设计内容，即使是验证性实验，也需要将需要验证的理论通过一系列假定简化取代，变成实验模型，利用可以得到的实验条件，规划实验布局，设计合理的实验步骤；完成实验后，还需要对实验结果进行归纳、分析，与目标对比，寻找问题，得到结论。所以，除了操作本身，所有的步骤都需要设计，这就是实验设计。没有实验设计，实验结果是无法获得的。

掌握实验目的和原则，以及一定的实验方法，就可以对任意拓扑的电路，设计实验步骤，设计实验数据记录表格，确定所需要观察的波形，作出相应的分析和处理。

3.1 对于给定任务的实验

对于给定实验题目，需要先了解：“这个实验是做什么的，要解决什么问题（达到什么目标）”、“要用到哪些理论、手段（包括仿真）和实验仪器”，以及“还有没有其他方法”等三个内容，分析后再明确实施方案，制定实验内容（寻求那些可以说明实验目标的方法），根据实验规程做好实验步骤的设计（如强、弱电结合的系统，先做好弱电设计的调试，再做强电部分的实验）。

下面以两个例子来说明实验的设计。

例 1 信号与系统设计实验——“线性时不变系统特点分析与验证”（摘自华中科技大学电气与电子工程学院 2006 级本科生 B 的设计报告）

任务

根据教材及相关资料，总结线性时不变系统特点，并通过实验对所总结的各特点进行验证。

要求

（1）从原理上分析线性时不变系统特点。

（2）针对各特点，分别设计相应的实验，利用实验中心条件进行验证。

（3）针对验证结果，进行分析和讨论。

方案设计过程

问题一：如何系统而全面地归纳线性时不变系统的特性？

问题二：如何把抽象的系统构造出来？

问题三：如何完成验证？

问题一的解决：线性时不变系统的分析与验证，一开始看这个题目，很多人不知道如何下手，觉得这个题目太大、太空泛，而且比较抽象，不像做一个滤波器或写一个程序那么具体。我的想法是先系统地总结和分析线性时不变系统的特点，包括原理的学习和自己的概括总结，从抽象的理论知识中对线性时不变系统有一个全面的认识。

问题二的解决：具体构造出线性时不变系统，并且用学到的理论知识对这个系统进行实

验以得到理论中预想的结果，首先想到的是实验的方法，搭建出一个具体的电路作为线性时不变系统。在构造系统的时候，我第一次接触到仿真这个概念，在仿真的软件环境中搭建线性时不变系统。

问题三的解决：系统搭建起来后，根据最先的原理学习，对线性时不变系统的典型特点分别设计相应的输入，得到预计的输出，从而达到验证的目的。尤其是软件仿真，可以根据线性时不变系统的特点，随心所欲地设计验证性实验。

仿真与实验的关系：我本来想先用实验室的器件做实验，然后再用仿真来验证实验结果。为此还专门请教了学长。他告诉我，一般是先进行软件仿真，仿真成功了再去做实验验证，这样比较科学、合理。后来跟导师聊过，了解到他们的工作方法，对于仿真与实验的关系又有了更加深刻的认识。我觉得这又让我学到了很重要的一个科研方法。

有了一个大致思路，并且解决了各个环节的关键问题后，我的报告可以付诸实践了！

设计简介

主题

(1) 分析与验证线性时不变系统的特点；

(2) 利用 Matlab 软件进行系统的仿真与分析验证。

方法

(1) 通过学习课本及参阅相关书籍从理论上分析线性时不变系统的特点；

(2) 利用 Matlab 软件中的 Simulink 对系统进行仿真，分别验证线性时不变系统的各个特点；

(3) 利用 Matlab 软件中的 M-file 编写程序，进一步验证线性时不变系统的各个特点。

开展工作(设计路线)

(1) 查阅相关书籍资料，整理线性时不变系统特性的理论知识。

(2) 利用 Matlab 进行编程和仿真，进一步分析和验证线性时不变系统的特性。

(3) 用实验室的示波器和电路板等硬件测量并观察线性时不变系统的零输入响应、零状态响应及全响应。

……

例 2　电力电子电路及控制系统综合实验

步骤一　分析实验内容所涉及的电力电子变换器的功能

电力电子变换器通过不同的拓扑实现不同的变换功能，其中包含各种器件(可控器件或不可控器件；有源器件或无源器件)，其功能或电路特征体现在如下几个方面：

(1) 将 DC 电能或 AC 电能转变为不同等级的 DC 电能或不同频率的 AC 电能；

(2) 通过调节占空比，电路既可以成为升压电路，也可以成为降压电路；

(3) 通过不同的滤波电路设计或开关频率设计，其输入和输出的电流可以是连续的，或断续的；

(4) 开关管是硬开关方式或软开关方式，体现在开关管的电压、电流波形方面，或开关损耗方面。

验证以上变换器功能的实验，应设计能观察以上现象或调节功能的实验步骤，了解实验设备能提供的条件，确定实现方案，以及确定相应要记录的波形。通常这样的验证变换器功能的实验采用开环完成。

步骤二　分析并设计电力电子变换器的实验条件

实验设计及电路参数设计都需要了解实验条件，即变换电路的功能要求。例如，如果设计

变换器功率为 100 W，则可从以下 3 个方面设计。

降压实验：输入电压(100±20%) V；输出电压 50 V，输出最大电流 I_e 为 2 A。

升压实验：输入电压 (50±20%) V；输出电压 100 V，输出最大电流 I_e 为 1 A。

保证输出滤波器电感电流连续时的最小负载电流为 $10\%I_e$。

步骤三　确定实验内容

内容一　要观察的电力电子变换器稳态性能

作为闭环控制系统，输出需要跟踪指令输入(希望输出)。作为电力电子稳态电源这样的闭环控制系统，或电机速度控制中稳定速度的控制系统，在额定参数给定下存在一个额定工作点，以及受到各种扰动时要求满足一定的精度(稳态误差要求)。

所谓扰动，这里是指功率供电电源电压的变化，或负载的变化。功率供电电源的变化通常规定了一个范围，如降压电路，规定输入电压为(100±20%) V，输出电压为(50±2%) V，即在输入电压变化范围在 80～120 V 时，要求输出电压稳定在 49～51 V。注意，超过这个电压变化范围，输出是不保持所设计的精度的。

负载的变化则为空载到满载(额定功率为 100 W)。空载实际上还包括了为了保证电感电流连续而设置的固定负载；但它不反映在实验电路的负载中(即实验记录表格中)。

考虑一种扰动对控制性能的影响时，通常忽略其他因素影响，让另一扰动为 0，即

$$e_{\text{ss-Source}} = e_{\text{ss}}\Big|_{\Delta\text{Load}=0} = \lim_{s\to 0} sE(s)\Big|_{\Delta\text{Load}=0}$$

$$e_{\text{ss-Load}} = e_{\text{ss}}\Big|_{\Delta\text{Source}=0} = \lim_{s\to 0} sE(s)\Big|_{\Delta\text{Source}=0}$$

因此，所设计的实验数据表格应该包括以下内容。

(1) 额定工作点确定和测量值：额定输入(如 100 V)、额定负载时的输出电压(转速)。

(2) 输入电压特性(固定负载，在规定范围内变化输入电压)：空载时的输出测量表格、半载时的输出测量表格，以及满载时的输出测量表格。

(3) 负载特性(固定电源电压，变化负载从空载到满载)：电源电压为额定值时空载到满载的输出测量表格。

内容二　观察动态特性

稳定输出为某一固定值不变的控制系统，称为恒值调节系统。这类系统控制的目的是通过调节维持输出为与输入对应的恒定值。通常在理论上，超调量是在输入量变化(如阶跃输入)时考核系统输出与输入的动态响应情况。在电力电子变换器这类稳压电源控制系统中，阶跃输入(如启动过程)时，过大的动态误差将导致系统的磁性元件(变压器或电感)饱和、冲击电流过大而导致电路元件损坏，因此都设计了软启动电路，使给定输入缓慢上升，动态误差不至于过大，超调量不会很大，甚至不出现超调。因此，在具有软启动功能这样的电路中，采用理论上突加输入来观察超调量是无法实现的。

超调量实际上可以通过扰动作用时系统输出的变化来测量。扰动作用下，系统输出会偏离原平衡值，并在动态过程中显示出与给定输入值变化时同样的超调现象(因为系统的特征方程相同，因而阻尼比相同)。

因此，电力电子控制系统(稳定输出电压的电压控制或稳定电机速度的速度控制)，可以通过施加扰动作用来观察动态响应。实际电力电子电路中的典型扰动通常有两种：功率供电电源的变化，或负载的变化。功率供电电源的变化在实验中比较难以实现(改变电压通常是通过调节输入电源侧的调压器来实现的，调压器的调节为手动机械式的，时间常数远大于电路变化

的时间常数，难以观察到动态过程），而负载的扰动则比较容易实现。一般在实验装置上，电阻和电感负载要设置成不同的挡（开关），可以方便地突加 50%～100%负载或突减 50%～100%负载，以便观察动态响应。

步骤四　实验方法及步骤设计

电力电子电路实验首先要保证电路工作正常，才能开始测量其性能。电路工作正常是指控制电路、主电路、测量电路等各部分功能正常。每一部分工作不正常都会导致这个系统工作不正常，甚至烧毁电路元件。因此，分别检查各部分工作状况非常重要，这也是训练科研和调试动手能力的基础。

1）控制电路

控制电路工作正常包括：启动电路（软启动电路）的脉冲开放/封锁和脉冲逐渐变宽的情况；反馈和误差调节过程中的脉冲调宽的情况；

若保护功能不正常，则不能保证电路功率元件不损坏，不能给主电路通电。

2）测量电路

指各种测量仪器的正确接入以便调节、监测电路工作状况，以及为了反馈所应接入的各种传感器。有些传感器（如电流互感器和电压互感器）不需要另接电源，有些传感器（如霍尔式传感器）需要接控制电源，实验前应了解需要接入哪些传感器，需要接入的电源幅值及电源极性等要求，了解检测信号从哪里输出到接入控制电路，输出幅值应为多大，等等。

3）主电路

主电路工作正常包括：电源、各元件选择和连接正确；接通电源后，开关管随控制驱动脉冲宽度变化而正常导通和关断；输出滤波器输出波形和幅值与设计相符。

按照以上各项，实验步骤确定原则如图 0-1 所示。

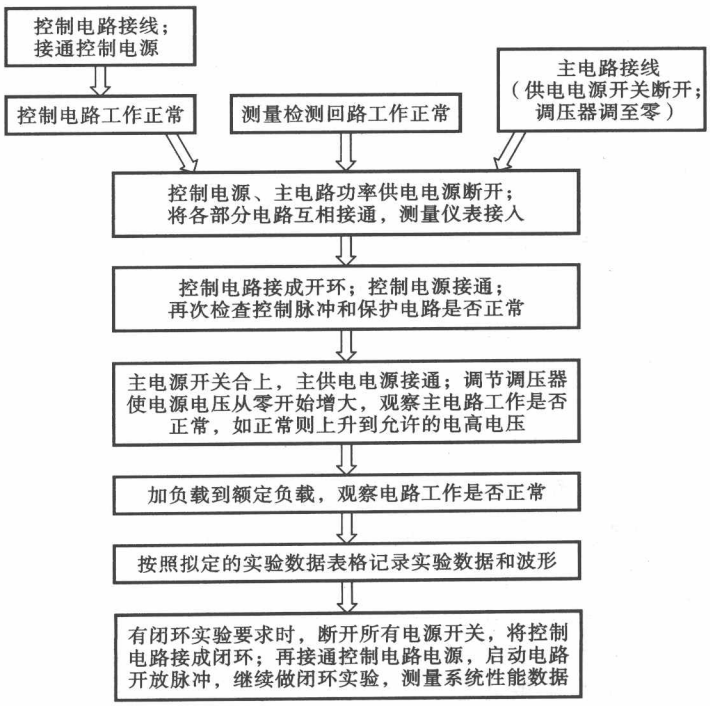


图 0-1　电力电子电路及控制系统实验设计步骤