

卓越工程师培养计划·高职高专教材·电子信息

# 模拟电子技术

## 设计、仿真与制作

——项目驱动教程

7 大任务+ 12 个项目+ 2 篇拓展知识+Proteus



杨永  
主编



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

卓越工程师培养计划·高职高专教材·电子信息

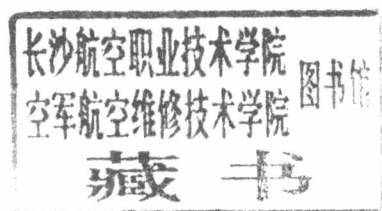
# 模拟电子技术设计、仿真与制作

主 编 杨 永

参 编 沙 祥 张洪明 潘汉怀 孙岐峰 杜 锋



KH 950 2 0340609 1



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书本着“工学结合、项目引导、任务驱动、教学做一体化”的原则编写，重点介绍直流电源、电压放大电路、功率放大器、集成运算放大器、滤波器和信号产生电路的设计、仿真与制作，拓展知识中介绍了场效应管及其放大电路。本书以项目为单元，以应用为主线，将理论知识融入到每一个教学项目中，通过不同的项目和实例来引导学生。所有电路设计均采用 Proteus 软件进行了仿真实验。

本书按照高职高专人才培养目标编写，可作为电子信息类专业模拟电子技术的教材，也可作为相关专业学生的自学参考书和培训教材。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

### 图书在版编目（CIP）数据

模拟电子技术设计、仿真与制作 / 杨永主编. —北京：电子工业出版社，2012.2

（卓越工程师培养计划）

ISBN 978-7-121-15648-9

I. ①模… II. ①杨… III. ①模拟电路—电子技术 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 282120 号

策划编辑：王敬栋（wangjd@phei.com.cn）

责任编辑：王敬栋

印 刷：北京东光印刷厂

装 订：三河市鹏成印业有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：12.75 字数：326.4 千字

印 次：2012 年 2 月第 1 次印刷

印 数：4 000 册 定价：29.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

## 前 言

本书根据高职高专的培养目标,结合高职高专教学改革和课程改革的要求,本着“工学结合、项目引导、任务驱动、教学做一体化”的原则而编写。

众所周知,模拟电子技术在高职高专工科专业中占据着重要的地位。其中,晶体管分立器件的电路作为模拟电子技术学习的入门内容,又极其重要。传统模拟电子技术的教材主要以电路的分析为主,对电路中的阻容元件参数由来不能给出很好的解释,读者看完教材后还不能独立设计一款符合性能要求的电路。本书不但对常用模拟电子电路的分析给出详细的解释,同时也对电路的阻容元件参数的由来给出详细的推导过程,这是本书的第一特色。教材在内容安排上精心设计,把模拟电子技术应该掌握的基本内容,如二极管、双极型晶体管、集成运算放大器等作为重点学习内容,而把场效应管作为拓展内容,这是本书的第二特色。本书以项目为单元,以应用为主线,将理论知识融入到每一个教学项目中,通过不同的项目和实例来引导学生。项目的内容安排按照电子电路的设计与开发过程组织,即项目性能指标提出、项目方案设计、项目电路设计、项目电路仿真调试与性能确定、项目制作等步骤来安排,这是本书第三特色。考虑到软件仿真的直观性和在实训前对电路有一定的了解,所有教学内容在实际制作前都采用 Proteus 进行了仿真。一方面做到节约成本,另一方面也可以让学生通过学习,掌握先进软件的使用。Proteus 软件自带元器件库、电路编辑器、测试仪器等,可以按需构造电路、虚拟仿真和演示该电路的工作原理和动态过程。依托仿真软件,体现技术的先进性和实用性。

本书力求体现项目课程的特色与设计思想。项目内容选取力求具有典型性和可操作性,以项目任务为出发点,激发学生的学习兴趣。在教学安排上,紧密围绕项目开展,创设教学情境,尽量做到教学做一体化。充分利用多媒体、电子仿真软件和实际电路组织教学。每个项目实践内容的时间安排可根据项目大小确定,制作与调试时建议四节课连上。教学评价时,可根据教学过程采取项目评价与总体评价相结合,理论知识考核与实践操作考核相结合的方法,注重操作能力。

本书按照高职高专人才培养目标编写,可作为电子信息类各专业模拟电子技术的教材,也可作为相关专业学生的自学参考书和培训教材,参考学时数为 90 学时。本书的电子课件、思考与练习可在华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)和 <http://yydz.phei.com.cn> 下载。

本书由杨永主编,沙祥、张洪明、潘汉怀、孙岐峰和杜锋参编,沙祥编写了项目 1、项目 8 和项目 9;张洪明编写了项目 7;潘汉怀编写了项目 4 和项目 6;孙岐峰编写了项目 10;项目 11 和项目 12;杜锋编写了拓展知识和练习题,并对全书内容进行了修改;杨永编写了项目 2、项目 3、项目 5 和其余部分,并负责全书的统稿工作。在编写过程中得到了俞宁教授、聂开俊副教授、毛学军副教授和李朝林副教授的关心和支持,在此表示衷心感谢。感谢南京 55 所的郑传文高级工程师在本书的编写过程中给予了具体的指导,并在百忙之中审阅了书稿。

由于时间仓促,加之编者水平所限,书中难免有错误和不当之处,恳请各位读者批评指正。

编 者

# 目 录

任务一 电子系统直流电源设计与制作	1
项目 1 基于变压器的电子系统直流电源设计与制作	1
1.1 任务与要求	1
1.2 项目方案	1
1.3 项目设计	1
1.3.1 变压器 (Transformer)	2
1.3.2 半导体与晶体二极管 (Diode)	9
1.3.3 二极管的典型应用	18
1.3.4 直流电源的设计	27
1.4 项目制作	28
1.4.1 元器件识别与检测	28
1.4.2 元器件的插装工艺	34
1.4.3 手工焊接工艺	35
1.5 项目调试	39
1.5.1 变压器参数测试	39
1.5.2 单相桥式整流电路参数测试	40
1.5.3 电容器滤波单相桥式整流电路参数测试	40
1.5.4 直流稳压电源参数测试	41
任务二 电压放大电路设计与仿真	43
项目 2 固定偏置式电压放大器的设计与仿真	43
2.1 项目任务与要求	43
2.2 项目方案	43
2.3 项目设计	43
2.3.1 晶体管放大原理	44
2.3.2 晶体管的特性曲线及主要参数	47
2.3.3 基本放大电路的设计	49
2.3.4 放大电路的主要性能指标	51
2.3.5 基本放大电路的分析方法	52
2.3.6 项目元器件参数计算	58
2.4 项目仿真验证	60
项目 3 能自动稳定静态工作点的单管电压放大电路设计与仿真	63
3.1 项目任务与要求	63
3.2 项目方案	63
3.3 项目设计	63
3.3.1 工作点稳定电路的组成	63

3.3.2	电路稳定 Q 点的原理	64
3.3.3	工作点稳定电路的分析	64
3.3.4	电路的元件参数计算	66
3.4	项目仿真实验	66
项目 4	射极跟随器设计与仿真	68
4.1	项目任务与要求	68
4.2	项目方案	68
4.3	项目设计	68
4.3.1	射极跟随器组成	68
4.3.2	射极跟随器分析	69
4.3.3	射极跟随器设计	71
4.3.4	项目元器件参数计算	72
4.4	项目仿真实验	73
项目 5	多级放大电路设计与仿真	75
5.1	项目任务与要求	75
5.2	项目方案	75
5.3	项目设计	75
5.3.1	多级放大电路的引入	75
5.3.2	多级放大电路的分析	77
5.3.3	复合管	78
5.3.4	二级放大电路元件参数的确定及计算	79
5.4	项目电路的仿真与调试	80
<b>任务三</b>	<b>功率放大器设计与制作</b>	<b>83</b>
项目 6	功率放大器设计与制作	83
6.1	项目任务与要求	83
6.2	项目方案	83
6.3	项目设计	83
6.3.1	功率放大电路简介	83
6.3.2	互补对称式功率放大电路	87
6.3.3	集成功率放大器	96
6.3.4	功率放大器设计	98
6.4	项目仿真调试	100
6.5	实物调试注意事项	104
<b>任务四</b>	<b>集成运算放大器基本运算电路设计</b>	<b>105</b>
项目 7	集成运算放大器基本运算电路设计	105
7.1	任务与要求	105
7.2	项目方案	105
7.3	项目设计	105
7.3.1	集成运算放大器	105
7.3.2	集成运算放大器各级电路	110



7.3.3	集成运算放大器的基本分析方法	119
7.3.4	基本运算电路的设计与仿真验证	120
<b>任务五</b>	<b>基于集成运算放大器的滤波器设计与仿真</b>	<b>135</b>
项目 8	有源低通滤波器设计与仿真	135
8.1	任务与要求	135
8.2	项目方案	135
8.3	项目设计	135
8.3.1	滤波器 (Filter) 简介	135
8.3.2	一阶有源低通滤波器的设计	137
8.3.3	二阶有源低通滤波器的设计	139
项目 9	有源高通滤波器设计与仿真	144
9.1	任务与要求	144
9.2	项目方案	144
9.3	项目设计	144
9.3.1	一阶有源高通滤波器的设计	144
9.3.2	二阶有源高通滤波器的设计	146
<b>任务六</b>	<b>信号产生电路设计与制作</b>	<b>151</b>
项目 10	正弦波产生电路设计与制作	151
10.1	项目任务与要求	151
10.2	项目方案	151
10.3	项目设计	151
10.3.1	正弦波产生电路原理	151
10.3.2	RC 振荡电路	153
10.3.3	电路仿真	155
10.4	项目制作	156
项目 11	矩形波产生电路设计与制作	158
11.1	项目任务与要求	158
11.2	项目方案	158
11.3	项目设计	158
11.3.1	LM358 非线性应用	158
11.3.2	参数验证	160
11.3.3	矩形波产生电路设计	162
11.4	项目制作	165
项目 12	三角波产生电路设计与制作	167
12.1	项目任务与要求	167
12.2	项目方案	167
12.3	项目设计	167
12.3.1	三角波产生电路	167
12.3.2	电路仿真	168
12.4	项目制作	169

<b>任务七 拓展知识</b> .....	171
<b>拓展知识 13 场效应管及其放大电路</b> .....	171
13.1 结型场效应管 .....	171
13.2 绝缘栅场效应管 .....	174
13.3 场效应管放大电路 .....	177
<b>拓展知识 14 晶体管的发展历程</b> .....	180
<b>附录</b> .....	182
附录 A 课后思考与练习题 .....	182
附录 B 标准电阻值查询表 .....	184
附录 C 常用电子元器件介绍 .....	185



## 电子系统直流电源设计与制作

### 项目 1 基于变压器的电子系统直流电源设计与制作

#### 1.1 任务与要求

##### 任务:

- 设计并制作一个可以同时输出多组电压的直流稳压电源。

##### 基本要求:

- 使用市电（220V/50Hz）作为直流稳压电源的供电。
- 直流稳压电源可以稳定地输出两组电压：+5V 和-5V，误差不超过 5%。
- 每组输出电压的纹波系数小于-40dB。
- 输出电流不小于 1A。

#### 1.2 项目方案

根据本项目的的基本要求分析，可以看出本项目至少需要以下功能模块：

- 交流一直流变换功能模块。
- 稳压功能模块。
- 滤除纹波功能模块。
- 降压功能模块。

#### 1.3 项目设计

根据项目方案选取相应的元器件和设备来完成系统的功能设计。在设计前，要充分了解元器件和设备的理论知识。设计完成后，还要通过软件仿真来验证设计的正确性。

### 1.3.1 变压器 (Transformer)

#### 1. 简介

变压器是利用电磁感应原理来改变交流电压的装置，主要构件是绕组和铁心（磁心），如图 1-1 所示。

铁心是变压器中主要的磁路部分。通常由含硅量较高、表面涂有绝缘漆的热轧或冷轧硅钢片叠装而成。铁心分为铁心柱和横片两部分，铁心柱套有绕组；横片是用来闭合磁路的。

绕组是变压器的电路部分，由双丝包绝缘扁线或漆包圆线绕成。

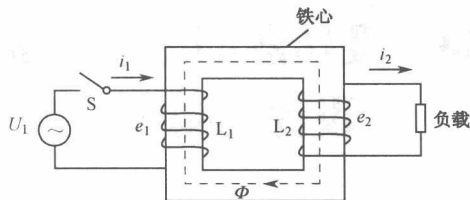


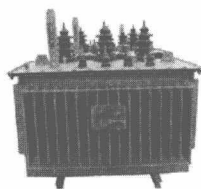
图 1-1 变压器结构示意图

一般把连接交流电源的绕组称为“一次绕组”；而跨于此绕组的电压称为“一次电压”。其余的绕组叫二次绕组。

当一次绕组中通有交流电流时，铁心中便产生交流磁通，使二次绕组中感应出电压。二次绕组中的感应电压可能大于、小于或等于一次电压，它是由一次绕组与二次绕组间的“匝数比 ( $N$ )”所决定的。而理想变压器的“匝数比 ( $N$ )”与一次绕组和二次绕组电感值的关系如下：

$$N = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}$$

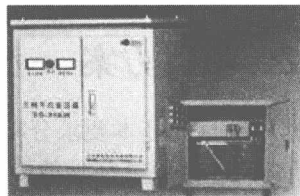
实际使用的变压器种类很多，分类方法也有多种。图 1-2 所示的是常见的变压器。



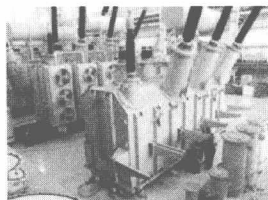
(a) 油浸式变压器



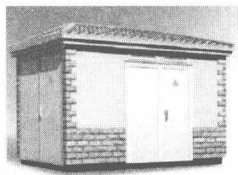
(b) 树脂浇注干式变压器



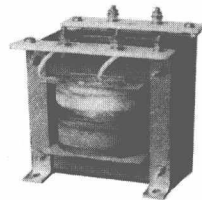
(c) 隔离变压器



(d) 大功率高压配电变压器



(e) 箱式变压器



(f) 控制变压器

图 1-2 常见的变压器

在电气设备和无线电路中，变压器的常用功能是升降电压、匹配阻抗、安全隔离等。

## 2. 参数选取

不同种类的变压器有着与之对应的技术要求和相应的技术参数。电源变压器的主要技术参数包括额定功率、额定电压和电压比、额定频率、工作温度等级、温升、电压调整率、绝缘性能和防潮性能等。

根据项目基本要求和方案分析，本项目变压器及其参数选择如下：

- ▶ 本项目应选用降压变压器。
- ▶ 由于同时输出正、负电压，应选用二次绕组为三端输出的变压器，其中间输出端作为参考地。
- ▶ 考虑到电路中的损耗及其他因素，经过降压处理的交流电的有效值应大于最终电压输出值。对于市面上比较常见的变压器，其二次绕组输出的交流电压有效值比较常见的为9V或12V，此时变压器的匝数比约为25或18。
- ▶ 变压器的额定功率应不小于10W ( $5 \times 1 + 5 \times 1 = 10\text{W}$ )。

对于其他参数要求，一般市面上出售的变压器都能满足。

## 3. 参数验证

为了验证设计的可行性和参数的正确性，往往需要进行软件仿真，其结果对实际设计有一定的指导意义，但不能取代实际设计。

在本书中，主要使用 Proteus 软件进行仿真。

### 1) 添加待用元器件

打开 Proteus 软件，新建设计后，在如图 1-3 所示元器件区内添加本设计所需要使用的元器件。此时，单击图 1-3 所示的“P”按钮，即可打开 Proteus 的元器件库。



图 1-3 Proteus 的元器件区

在本项目中，使用市电（220V/50Hz）作为供电，所以需要添加一个交流电源。在 Proteus 中，“Simulator Primitives”库里包含模拟的电源与信号源。在其中选取“ALTERNATOR”，即交流发电机，如图 1-4 所示。用鼠标左键双击“ALTERNATOR”，将

其添加到元器件区。

此时，在图 1-3 所示的元器件区就可以看到新增加的“ALTERNATOR”（交流发电机）了。

如果不知道元器件所属的元器件库，则可以通过关键字（Keywords）搜索获得。对于本项目中的变压器，在打开的元器件库对话框的“Keywords”文本框中输入“Transformer”，此时就可以找到变压器所在的库“Inductors”。

在“Inductors”库中，提供了多种变压器，本项目选取“TRAN-2P3S”变压器，如图 1-5 所示。

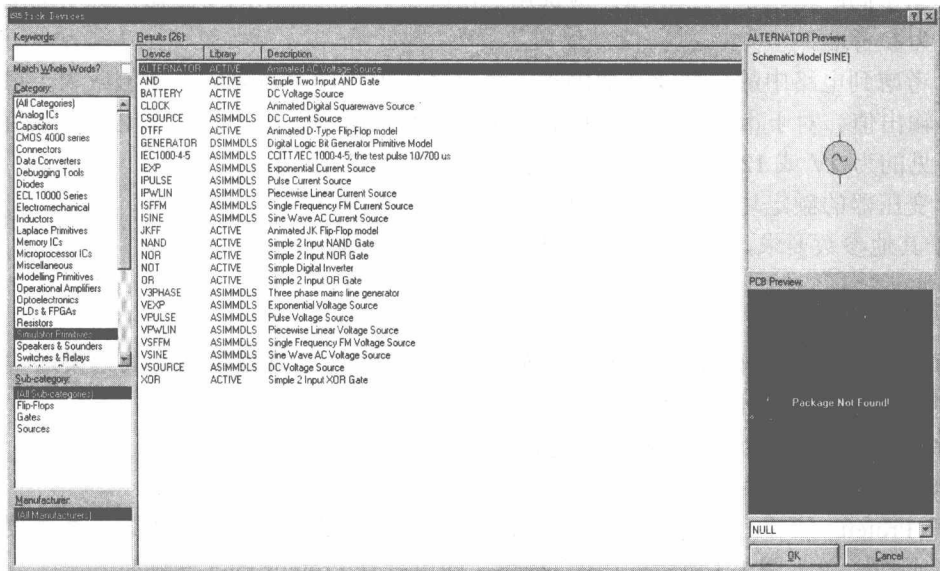


图 1-4 “Simulator Primitives” 库

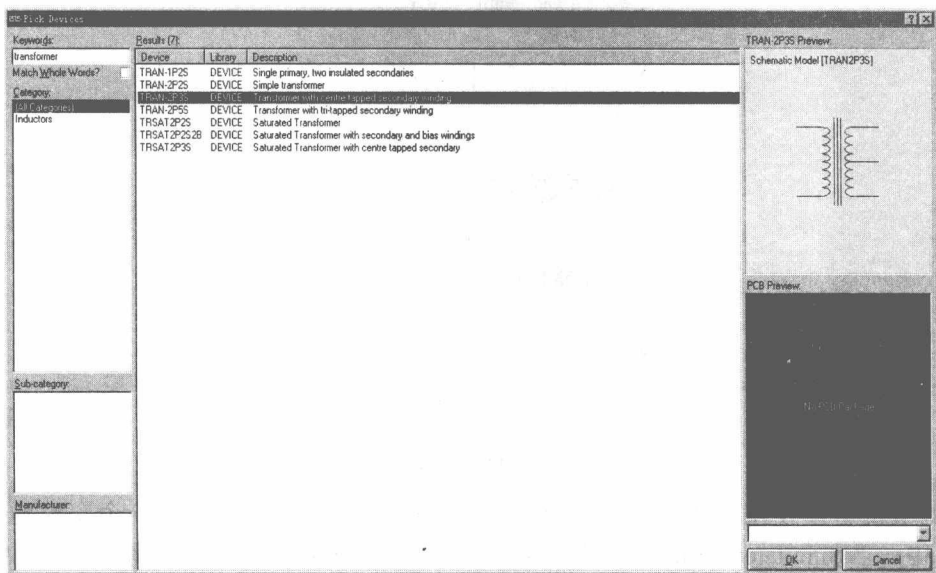


图 1-5 Inductors 库与 TRAN-2P3S

“TRAN-2P3S”变压器的英文描述为“Transformer with centre tapped secondary winding”，即二次绕组有中间抽头的变压器，符合本项目的要求。

用鼠标左键双击“TRAN-2P3S”，将其添加到元器件区。

## 2) 放置元器件与元器件属性设置

在添加了元器件后，就可以在电路原理图中放置元器件了。表 1-1 列出了 Proteus 中放置元器件的基本操作。

表 1-1 Proteus 中放置元器件的基本操作

基本操作	说明
放置元器件	在元器件区，选中需要放置的元器件，然后在电路原理图中单击鼠标左键，元器件就会出现在光标所在的位置
选中元器件	用鼠标左键或右键单击元器件，就可以使其呈选中状态，被选中的元器件呈红色
删除元器件	在元器件上用鼠标右键单击两次可以删除元器件
移动元器件	确认元器件在选中状态（元器件呈红色），用鼠标左键将其拖曳到需要位置
打开元器件属性对话框	使元器件处于选中状态（元器件呈红色），再次单击鼠标左键即可弹出元器件属性对话框

(1) 放置交流发电机，如图 1-6 所示。放置完成后，打开交流发电机属性设置对话框，如图 1-7 所示。

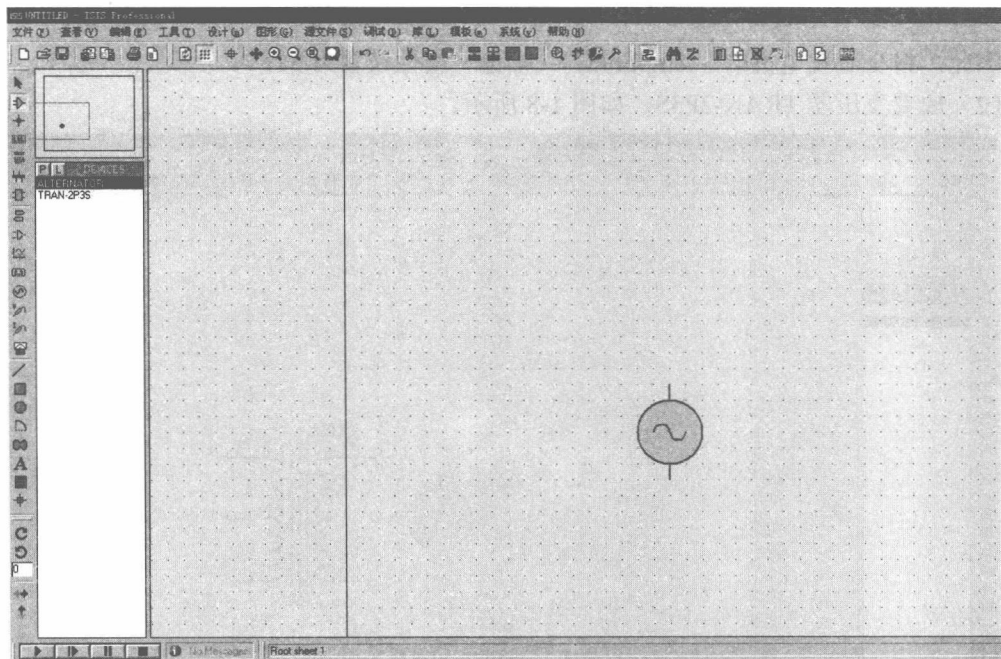


图 1-6 放置交流发电机

我国的市电电压有效值为 220V，频率为 50Hz，其波形为正弦波。从图 1-7 中可以看出，本项目需要设置的属性是“Amplitude”（幅值）和“Frequency”（频率）。

可以毫不犹豫地把“Frequency”（频率）设置为 50Hz。那么，“Amplitude”（幅值）该

怎么设置呢？

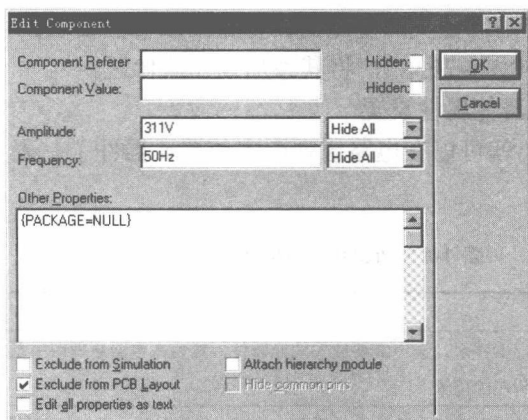


图 1-7 交流发电机属性设置对话框

根据以前所学的知识可以知道，对于正弦波来说，幅值与有效值之间的关系如下：

$$\frac{U_{\text{幅值}}}{U_{\text{有效值}}} = \frac{2}{\sqrt{2}}$$

由此可以计算出市电电压的幅值：

$$U_{\text{幅值}} = \frac{U_{\text{有效值}} \times 2}{\sqrt{2}} = \frac{220 \times 2}{\sqrt{2}} \approx 311(\text{V})$$

因此，将交流发电机的” Amplitude”（幅值）属性设置为 311V。

(2) 放置变压器 TRAN-2P3S，如图 1-8 所示。

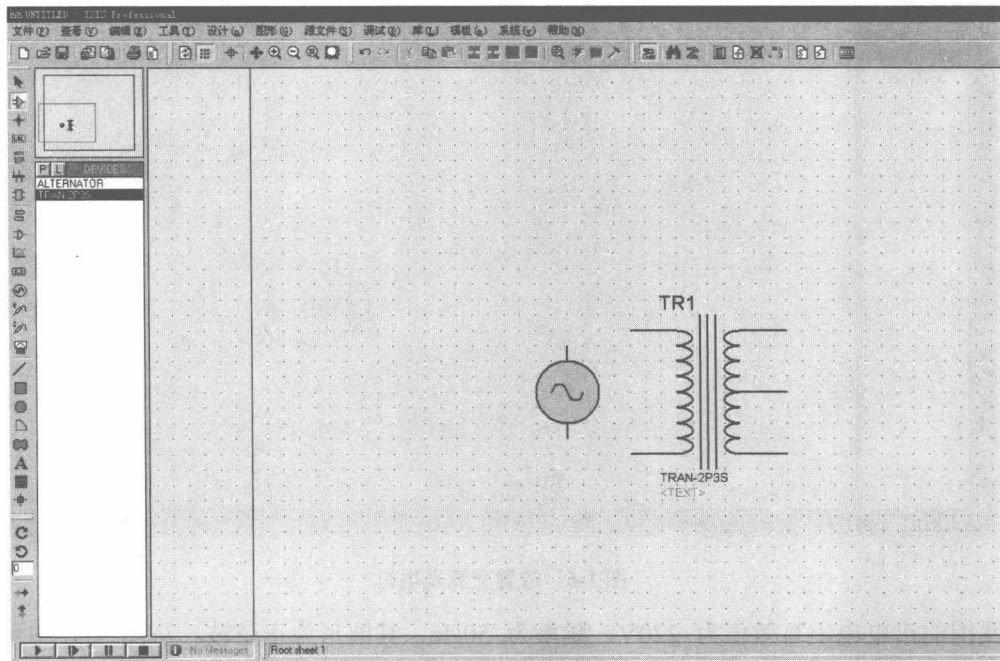


图 1-8 放置变压器 TRAN-2P3S

打开变压器 TRAN-2P3S 属性设置对话框,如图 1-9 所示。从图 1-9 中可以看出,变压器 TRAN-2P3S 的属性包括“Primary Inductance”(一次绕组电感)、“Total Secondary Inductance”(二次绕组总电感)、“Coupling Factor”(耦合系数)、“Primary DC resistance”(一次直流电阻)和“Secondary DC resistance”(二次直流电阻)。

在本项目中,变压器一次绕组和二次绕组的匝数比为 25。此时,变压器二次绕组输出的交流电压有效值约为 9V。一次绕组和二次绕组的电感值的比为 625。一次绕组的电感值默认值为 1H,可以不作修改。这样,只需要将二次绕组的电感值设置为 0.0016H。

但是,由于使用的是三段抽头电感器,其二次绕组是由两个参数完全相同的绕组串联构成的。因此,这两个绕组的电感值应该为 0.0008H。据此,可以设置好变压器的属性。

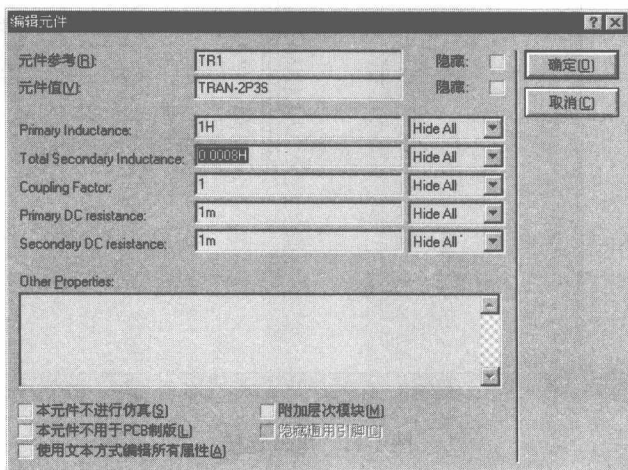


图 1-9 变压器 TRAN-2P3S 属性设置对话框

(3) 为了观察电压波形,还需要放置示波器,如图 1-10 所示。

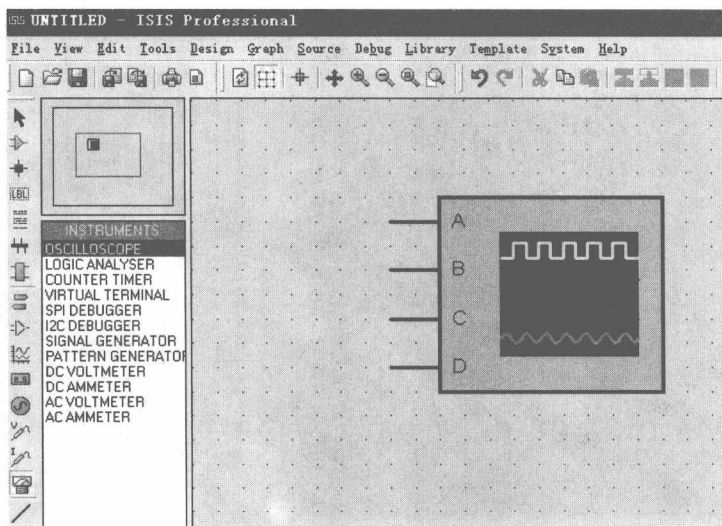


图 1-10 元器件区中的示波器



### 3) 电气连接

元器件放置完成后，就可以进行电气连接了，如图 1-11 所示。

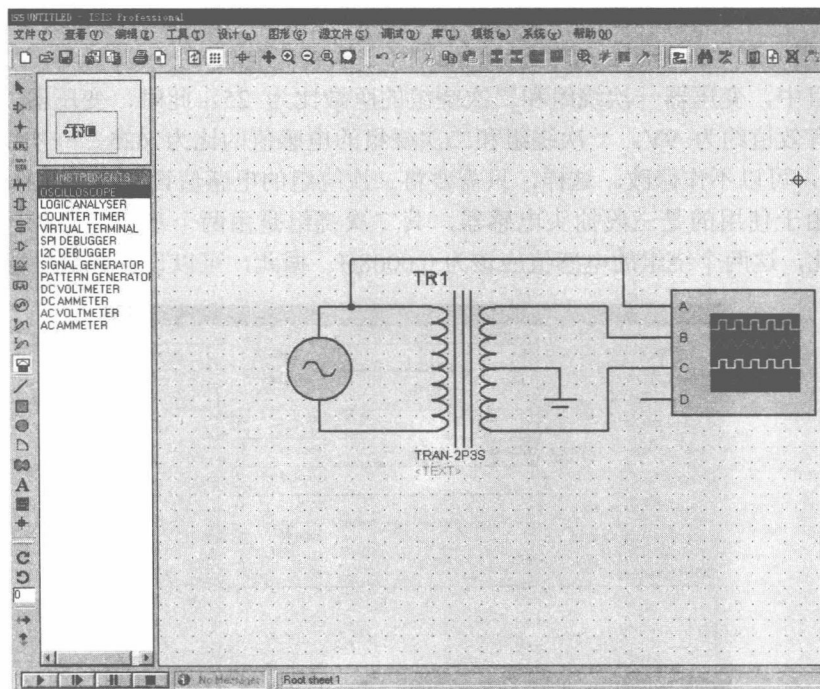


图 1-11 电气连接

### 4) 参数记录与比较

在电气连接完成后，可以打开虚拟开关进行电路仿真了。此时，在虚拟示波器上可以看到各个信号的波形，如图 1-12 所示。

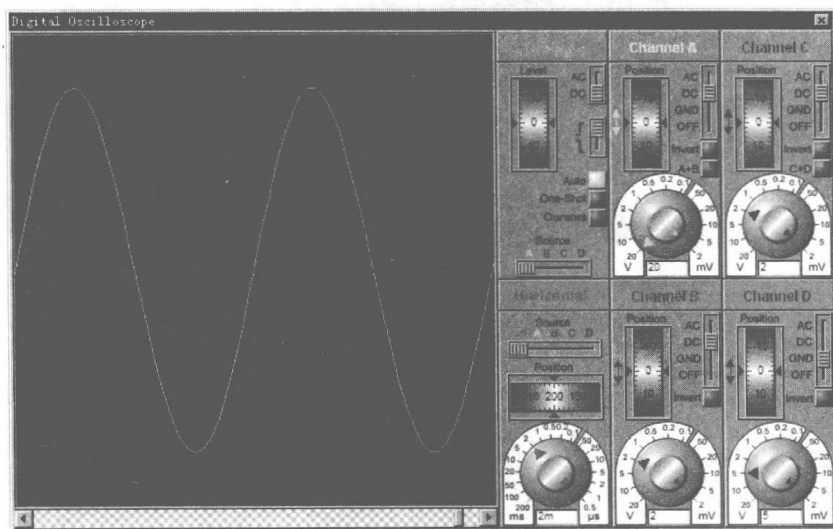


图 1-12 虚拟示波器波形

请将各个信号的参数记录在表 1-2 中，并计算一次电压和二次电压之间的比值。

表 1-2 电压参数记录表

	电压幅值			电压有效值	周期		
	挡位 (V/Div)	格数	计算值		挡位 (ms/Div)	格数	计算值
一次绕组							
二次绕组 1							
二次绕组 2							
参数比较							

### 1.3.2 半导体与晶体二极管 (Diode)

在本项目中，需要交流一直流变换功能模块和稳压功能模块。这两个功能模块同半导体技术紧密相关。

半导体 (Semiconductor) 是指常温下导电性能介于导体 (Conductor) 与绝缘体 (Insulator) 之间的材料。按化学成分可分为元素半导体和化合物半导体两大类。其中锗 (Germanium, Ge) 和硅 (Silicon, Si) 是最常用的元素半导体。

化合物半导体包括 III-V 族化合物 (砷化镓、磷化镓等)、II-VI 族化合物 (硫化镉、硫化锌等)、氧化物 (锰、铬、铁、铜的氧化物)，以及由 III-V 族化合物和 II-VI 族化合物组成的固溶体 (镓铝砷、镓砷磷等)。

除了上述晶态半导体外，还有非晶态的玻璃半导体、有机半导体等。

#### 1. 本征半导体

完全纯净的、结构完整的半导体材料称为本征半导体。

硅或锗的原子结构和共价键结构如图 1-13 所示。可以看出，共价键内的两个电子由相邻的原子各用一个价电子组成，称为束缚电子。

随着温度的升高，半导体材料中的束缚电子脱离共价键成为自由电子，在原来的位置留有一个空位，此空位称为空穴，这种现象被称为本征激发。空穴的出现是半导体导电区别于导体导电的一个主要特征。在本征半导体中，自由电子和空穴成对出现，数目相同，如图 1-14 所示。

如图 1-15 所示，空穴 (位置 1) 出现以后，邻近的束缚电子 (位置 2) 可能获取足够的能量来填补这个空穴，而在这个束缚电子的位置又出现一个新的空穴，另一个束缚电子 (位置 3) 又会填补这个新的空穴，这样就形成束缚电子填补空穴的运动。为了区别自由电子的运动，将其称为空穴运动。