

全国大学生电子设计竞赛 培训系列教程 模拟电子线路设计



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

高吉祥 主编
唐朝京 主审

全国大学生电子设计竞赛培训系列教程

模拟电子线路设计

主 编 高吉祥

主 审 唐朝京

刘希顺 刘菊荣 高 勳 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是针对历年全国大学生电子设计竞赛的特点和需要,为高等院校的信息工程、通信工程、自动化和电气控制类专业学生而编写的学科培训教材之一——《模拟电子线路设计》。全书共3章涉及模拟电子线路部分的内容和赛题特点。书中简要介绍了稳压稳流电路、放大电路和波形产生电路的基本原理,并以提高设计制作能力为出发点,精选部分典型赛题,进行详细的题目分析、方案论证和设计方法介绍。

本书内容丰富实用、叙述条理清晰、工程性强、可作为全国大学生电子设计制作竞赛的培训教材,同时也可作为参加各类电子制作、课程设计、毕业课计的教学参考书,以及从事电子工程各类人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子线路设计/高吉祥主编. —北京:电子工业出版社,2007.5

(全国大学生电子设计竞赛培训系列教程)

ISBN 978-7-121-04274-4

I. 模… II. 高… III. 模拟电路—电路设计—技术培训—教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 058875 号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂
装 订:

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: 787×980 1/16 印张: 20.25 字数: 454 千字

印 次: 2007 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 29.00 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 zlts@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

全国大学生电子设计竞赛培训系列教程

编审委员会

主任委员

罗伟雄(北京理工大学教授、全国大学生电子设计竞赛责任专家)

副主任委员

唐朝京(中国软件学会嵌入式系统分会副理事长、全国大学生电子设计竞赛湖南赛区组委会主任、国防科技大学电子科学与工程学院院长、教授、博士生导师)

陈晓莉(电子工业出版社 高等教育分社)

委 员

陈明义(全国大学生电子设计竞赛专家、中南大学教授、博士)

库锡树(全国大学生电子设计竞赛湖南赛区组委会成员兼秘书长、国防科技大学教授)

卢启中(全国大学生电子设计竞赛专家、湖南赛区专家组组长、国防科技大学教授)

徐 欣(中国软件学会嵌入式系统分会常务理事、国防科技大学教授)

高吉祥(电子技术基础系列教材(“十一五”规划教材)主编、全国大学生电子设计竞赛培训系列教程主编、国防科技大学教授)

前 言

全国大学生电子设计竞赛是由教育部高等教育司、信息产业部人事司共同主办的面向大学生、大专生的群众性科技活动,目的在于推动普通高等学校的信息电子类学科面向 21 世纪的课程体系和课程内容改革,引导高等学校在教学中培养大学生的创新意识、协作精神和理论联系实际学风,加强学生工程实践能力的训练和培养,鼓励广大学生踊跃参加课外活动,把主要精力吸引到学习和能力培养上来,促进高等学校形成良好的学习风气,同时也为优秀人才脱颖而出创造条件。

全国大学生电子设计竞赛自 1994 年至今已成功举办了七届。深受全国大学生的欢迎和喜爱,参赛学校、队和学生逐年递增。全国大学生电子设计竞赛组委会为了组织好这项赛事,编写了电子设计竞赛获奖作品选编,深受参赛队员的喜爱。有许多参赛队员和辅导教师反映,若能编写一部从基本技能培训、单元电路设计直至综合设计系列教程,那将是锦上添花。2006 年北京理工大学罗伟雄教授在湖南指导工作时也曾提出这个设想,当时就得到了国防科技大学的领导和教员响应。立即组建了“全国大学生电子设计竞赛培训系列教程编写委员会”,并组织了几十名有着丰富教学经验授和曾经获得全国大学生电子设计竞赛大奖的在校研究生和博士生对历届的考题(约 43 题)重新设计制作一次。为这个系列教程的编写奠定了理论和实践的基础。

本系列教程分为五册,共 23 章。

第一分册《基本技能训练与单元电路设计》,又称基础篇,共有 7 章(第 1 章~第 7 章)。主要介绍了全国大学生电子设计竞赛基本情况,命题原则及要求,竞赛题所涉及的知识面与知识点;全国大学生电子设计竞赛流程;电子设计竞赛制作基本训练;单片机最小系统设计制作;可编程逻辑器件系统设计制作培训;电子系统设计的基本方法及步骤;常用中小规模集成电路的应用设计课题。

第二分册《模拟电子线路设计》,共有 3 章(第 8 章~第 10 章)。主要介绍了交直流稳压电源设计、放大器设计及信号源设计。

第三分册《高频电子线路设计》,共 4 章(第 11 章~第 14 章)。主要介绍了高频电子线路设计基础、无线电发射机的设计、无线电接收机的设计及无线电收发系统设计。

第四分册《电子仪器仪表设计》,共有 6 章(第 15 章~第 20 章)。主要介绍时频测量仪设计、电气参数测量仪设计、时域测量仪设计。元器件参数测量仪设计、频域测量仪设计及数据域测试仪设计。

第五分册《数字电路与自动控制系统设计》,共 3 章(第 21 章~第 23 章)。主要介

绍数字电路设计、自动控制系统设计、实验箱的组成、原理及效果。

本书是第二册——《模拟电子线路设计》，共分为 3 章。

第 8 章交直流稳压、稳流电源设计，介绍了稳压、稳流电源的设计基础、简易数控直流电源设计、数控恒流源设计、直流稳压源设计、三相正弦变频电源设计及高频大功率感应加热电源设计。

第 9 章放大器设计，介绍了放大器设计基础、实用低频功率放大器设计、测量放大器设计、宽带放大器设计、高效率音频功率放大器设计及简易心电图仪设计。

第 10 章信号源设计，介绍了信号源设计基础、实用信号源的设计与制作及波形发生器的设计。

参加本书编写工作的有高吉祥、刘希顺、刘菊荣、高勳等人。全书由高吉祥主编，负责全书绝大部分的执笔、全书定稿与编校工作。刘希顺参与了第 8 章、第 9 章的编写工作，并负责全书校对。刘菊荣参与了第 10 章编写工作。高勳负责全书各章节的软件设计与编程。唐朝京教授为主审，负责全书的策划与审查。

因编写时间仓促，难免会出现错误，欢迎读者批评纠正，我们表示万分感谢。

联系地址：长沙 国防科技大学四院一系 高吉祥收

邮 编：410073

电 话：(0731)4553230, (0731)4575489

E-mail: gaojixiang1942@sohu.com

编 者
2007 年 2 月

常用文字符号说明

一、基本符号

1. 电流和电压

I_B, U_{BE}	大写字母、大写下标表示直流量
I_b, U_{be}	大写字母、小写下标表示交流有效值
\dot{I}_b, \dot{U}_{be}	大写字母上面加点、小写下标表示正弦相量
i_B, u_B	小写字母、大写下标表示总瞬时值
i_{be}, u_{be}	小写字母、小写下标表示交流分量瞬时值
V_{CC}, V_{BB}, V_{EE}	双极型三极管集电极、基极、发射极直流电源电压
V_{DD}, V_{GG}, V_{SS}	场效应管漏极、栅极、源极直流电源电压
I_i, U_i	输入电流、输入电压
I'_i, U'_i	净输入电流、净输入电压
I_o, U_o	输出电流、输出电压
$U_{o(AV)}$	输出电压平均值
U_{om}	最大输出电压
I_f, U_f	反馈电流、反馈电压
I_Q, U_Q	静态电流、静态电压
U_{REF}	参考电压
U_S	信号源电压
U_T	温度的电压当量
I_+, U_+	集成运放同相输入端的电流、电压
I_-, U_-	集成运放反相输入端的电流、电压

2. 功率

P	功率的通用符号
P_o	输出交变功率
P_{om}	输出交变功率最大值
P_v	电流提供的直流功率

3. 频率

B	通频带
f_H	放大电路的上限(-3dB)频率

f_l	放大电路的下限(-3dB) 频率
f_o	振荡频率、谐振频率
ω	角频率的通用符号
4. 电阻、电容、电感、阻抗	
R	大写字母表示电路中外接的电阻或电路的等效电阻
r	小写字母表示器件的等效电阻
R_i, R_o	电路的输入电阻、输出电阻
R_{if}, R_{of}	有反馈时电路的输入电阻、输出电阻
R_L	负载电阻
R_S	信号源内阻
G	电导的通用符号
C	电容的通用符号
L	电感的通用符号
X	电抗的通用符号
Z	阻抗的通用符号
5. 增益或放大倍数, 反馈系数	
A	增益或放大倍数的通用符号
A_c	共模电压放大倍数
A_d	差模电压放大倍数
A_i	电流放大倍数
A_u	电压放大倍数
A_p	功率放大倍数
A_{uf}	有反馈时的电压放大倍数
A_{us}	考虑信号源内阻时的电压放大倍数
F	反馈系数的通用符号

二、器件符号

1. 器件及引脚名称

B	晶体谐振器(晶体换能管)
b, c, e	双极型三极管的基极、集电极、发射极
D, G, S	场效应晶体管的漏极、栅极、源极
T	变压器
VD	二极管
VD _Z	稳压管

VT	双极型三极管(晶体管),场效应管
2. 器件参数	
A_{od}	集成运放的开环差模电压增益
$C_{b'e}, C_{b'e'}$	发射结、集电结等效电容
I_{CBO}	集电极 — 基极之间的反向饱和电流
I_{CEO}	集电极 — 发射极之间的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
I_{CAV}	整流二极管平均电流
I_S	二极管反向饱和电流
I_Z	稳压管稳定电流
I_{IB}	集成运放输入偏置电流
I_{IO}	集成运放输入失调电流
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
P_{DM}	漏极最大允许耗散功率
S_R	集成运放转换速率
U_Z	稳压管稳定电压
$U_{(BR)(CBO)}$	发射极开路时集电极 — 基极之间的反向击穿电压
$U_{(BR)(CEO)}$	基极开路时集电极 — 发射极之间的反向击穿电压
$U_{(BR)(EBO)}$	集电极开路时发射极 — 基极之间的反向击穿电压
U_{CES}	集电极 — 发射极之间的饱和管压降
U_{icm}	集成运放最大共模输入电压
U_{idm}	集成运放最大差模输入电压
U_{iQ}	集成运放输入失调电压
U_P	场效应管的夹断电压
U_T	场效应管的开启电压
B_G	集成运放的单位增益带宽
f_T	双极型三极管的特征频率
f_{α}, f_{β}	共基极截止频率、共射极截止频率
g_m	跨导
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结微变等效电阻
r_{be}	共射接法下基极 — 发射极之间的微变等效电阻
r_{ce}	共射接法下集电极 — 发射极之间的微变等效电阻
r_{DS}	场效应管漏极 — 源极之间的微变等效电阻
r_{GS}	场效应管栅极 — 源极之间的微变等效电阻

r_{id} 集成运放差模输入电阻
 α, β 共基极, 共射极电流放大系数
 $\bar{\alpha}, \bar{\beta}$ 共基极, 共射极直流电流放大系数

三、其他符号

D 非线性失真系数
 K_{CMR} 共模抑制比
 M 互感系数
 Q 品质因数
 S 整流电路的脉动系数
 S_r 稳压系数
 T 周期, 温度
 η 效率
 τ 时间常数
 φ 相位角

表 I 部分电气图用图形符号
 (根据国家标准 GB4728)

名称	符号	名称	符号	名称	符号
导线		传声器		电阻器	
连接的导线		扬声器		可变电阻器	
接地		二极管		电容器	
接机壳		稳压二极管		线圈, 绕组	
开关		隧道二极管		变压器	
熔断器		晶体管		铁心变压器	
灯		运算放大器		直流发电机	
电压表		电池		直流电动机	

表 II 部分电路元件的图形符号

名称	符号	名称	符号	名称	符号
独立电流源		理想导线		电容	
独立电压源		连接的导线		电感	
受控电流源		电位参考点		理想变压器	
受控电压源		理想开关		耦合电感	
电阻		开路		回转器	
可变电阻		短路		理想运放	
非线性电阻		理想二极管		二端元件	

表 III 常用逻辑门电路图形对照表

逻辑器件名称	原部标(SJ)符号	国标(GB)符号	美国(IEEE)符号
与门			
或门			
非门(相反器)			
缓冲器			
与非门			
或非门			
集电极开路与非门			
三态与非门			
异或门			
同或门			
与或非门			

目 录

第 8 章 交直流稳压、稳流电源设计	1
8.1 稳压、稳流电源设计基础	1
8.1.1 直流稳压电源	1
8.1.2 基准电压源	8
8.1.3 直流恒流源	19
8.1.4 开关稳压电源	24
8.2 简易数控直流电源设计(1994 年全国大学生电子设计竞赛 A 题)	28
8.2.1 题目分析	29
8.2.2 方案论证	30
8.2.3 硬件设计	34
8.2.4 软件设计	39
8.2.5 测试结果及结果分析	40
8.3 数控恒流源设计(2005 年全国大学生电子设计竞赛 F 题)	43
8.3.1 题目分析	44
8.3.2 方案论证	45
8.3.3 硬件设计	50
8.3.4 软件设计	62
8.3.5 测试方法及测试结果	65
8.4 直流稳压源设计(1997 年全国大学生电子设计竞赛 A 题)	66
8.4.1 题目分析	68
8.4.2 方案论证	69
8.4.3 硬件设计	72
8.4.4 数据分析及性能指标	81
8.5 三相正弦变频电源设计(2005 年全国大学生电子设计竞赛 G 题)	82
8.5.1 题目分析	83
8.5.2 方案论证	84
8.5.3 硬件设计	99
8.5.4 软件设计	108
8.5.5 系统测试	114
8.5.6 结论	118

8.6	高频大功率感应加热电源设计(来源科研课题)	119
8.6.1	感应加热的特点、机理及负载特性分析	119
8.6.2	整机设计	124
8.6.3	结论	146
第9章	放大器设计	147
9.1	放大器设计基础	147
9.1.1	概述	147
9.1.2	运算放大器	148
9.1.3	功率放大器	157
9.1.4	丁类(D类)功率放大器	158
9.1.5	专用集成放大电路介绍	160
9.2	实用低频功率放大器设计	190
9.2.1	题目分析	191
9.2.2	方案论证	192
9.2.3	硬件设计	193
9.2.4	测试结果及结果分析	198
9.3	测量放大器设计(1999年全国大学生电子设计竞赛A题)	202
9.3.1	题目分析	203
9.3.2	系统方案论证	205
9.3.3	系统硬件设计及参数计算	208
9.3.4	调试	212
9.3.5	测试数据	213
9.4	宽带放大器设计(2003年全国大学生电子设计竞赛B题)	214
9.4.1	题目分析	216
9.4.2	方案论证及比较	217
9.4.3	系统硬件设计	220
9.4.4	系统软件设计及流程图	225
9.4.5	系统调试和测试结果	226
9.5	高效率音频功率放大器设计(2001年全国大学生电子设计竞赛D题)	228
9.5.1	题目分析	230
9.5.2	方案论证	231
9.5.3	主要电路工作原理分析与计算	233
9.5.4	系统测试及数据分析	241
9.5.5	进一步改进的措施	242
9.6	简易心电图仪设计(2004年湖北省大学生电子设计竞赛B题)	243
9.6.1	简易心电图仪作品解析	246

9.6.2	系统设计	252
9.6.3	系统软件设计	256
9.6.4	系统测试方法及数据	259
第 10 章	信号源设计	261
10.1	信号源设计基础	261
10.1.1	正弦波振荡器	261
10.1.2	非正弦波振荡器	264
10.1.3	555 电路结构及应用	265
10.1.4	直接数字频率合成技术	268
10.2	实用信号源的设计和制作(1995 年全国大学生电子设计竞赛 B 题)	275
10.2.1	题目分析	276
10.2.2	方案论证	277
10.2.3	系统设计	281
10.2.4	调试过程	287
10.2.5	结束语	287
10.3	波形发生器设计(2001 年全国大学生电子设计竞赛 A 题)	288
10.3.1	题目分析	289
10.3.2	方案论证	290
10.3.3	系统设计	299
10.3.4	调试	303
10.3.5	指标测试	305
10.3.6	结论	306
参考文献	307

第8章 交直流稳压、稳流电源设计

内容提要

本章主要介绍了交直流稳压源、稳流源设计基础,设计方法和设计步骤。并通过大量例题详细介绍了方案论证、软、硬件设计、技术指标测试及测试结果分析。

8.1 稳压、稳流电源设计基础

电源是电子设备的能源电路,关系到整个电路设计的稳定性和可靠性。本节主要介绍直流稳压电源、直流恒流电源及交流稳压电源。

8.1.1 直流稳压电源

一、直流稳压电源的基本原理

直流稳压电源一般由电源变压器、整流电路、滤波电路及稳压电路所组成,如图8.1.1所示。

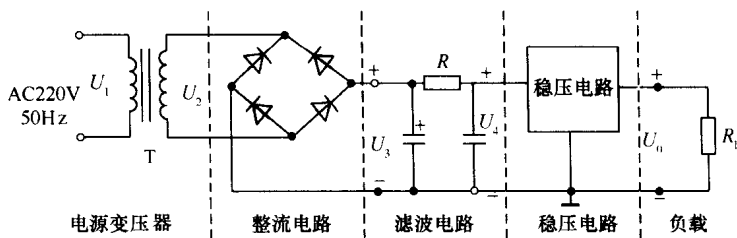


图 8.1.1 直流稳压电路基本组成

电源变压器的作用是将电网 220V 的交流电压 U_1 转换成整流电路所需要的电压 U_2 。整流电路的作用是将交流电压 U_2 转换成脉动的直流电压 U_3 。滤波电路的作用是将脉动直流电压滤除纹波,变成纹波小的直流电压 U_4 。稳压电路的作用就是将不稳定的直流电压转换成稳定的直流电压 U_0 。它们的关系为

$$U_1 = nU_2 \quad (8.1.1)$$

式中, n 为变压器的变压比。

$$U_3 = (1.1 \sim 1.2)U_2 \quad (8.1.2)$$

$$U_0 = U_4 - U_p \quad (8.1.3)$$

式中, U_p 为稳压器的降压, 一般为 $2 \sim 15V$ 。

二、串联型直流稳压电路

串联型直流稳压电路的原理图如图 8.1.2 所示。电路包括 4 个组成部分。

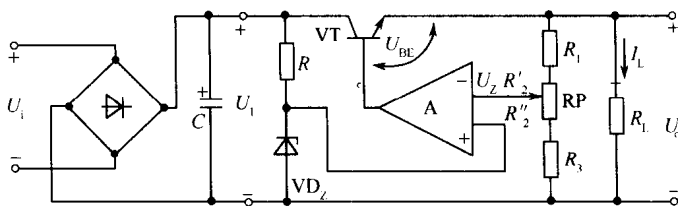


图 8.1.2 串联型直流稳压电路的原理图

1. 采样电阻

由电阻 R_1 、 RP 和 R_3 组成。当输出电压发生变化时, 采样电阻取其变化量的一部分送到放大电路的反相输入端。

2. 放大电路

放大电路 A 的作用是将稳压电路输出电压的变化量进行放大, 然后再送到调整管的基极。如果放大电路的放大倍数比较大, 则只要输出电压产生一点微小的变化, 即能引起调整管的基极电压发生较大的变化, 提高了稳压效果。因此, 放大倍数越大, 则输出电压的稳定性越高。

3. 基准电压

基准电压由稳压管 VD_z 提供, 接到放大电路的同相输入端。采样电压与基准电压进行比较后, 再将二者的差值进行放大。电阻 R 的作用是保证 VD_z 有一个合适的工作电流。

4. 调整管

调整管 VT 接在输入直流电压 U_i 和输出端的负载电阻 R_L 之间, 若输出电压 U_o 。由于电网电压或负载电流等的变化而发生波动时, 其变化量经采样、比较、放大后送到调整管的基极, 使调整管的集—射电压也发生相应的变化, 最终调整输出电压使之基本保持稳定。

现在分析串联型直流稳压电路的稳压原理。在图 8.1.2 中, 假设由于 U_i 增大或 I_L 减小而导致输出电压 U_o 增大, 则通过采样以后反馈到放大电路反相输入端的电压 U_F 也按比例地增大, 但其同相输入端的电压即基准电压 U_Z 保持不变, 故放大电路的差模输入电压 $U_{id} = U_Z - U_F$ 将减小, 于是放大电路的输出电压减小, 使调整管的基极输入电压 U_{BE} 减

小,则调整管的集电极电流 I_C 随之减小,同时集电极电压 U_{CE} 增大,结果使输出电压 U_o 保持基本不变。

以上稳压过程可简明表示如下:

$$U_i \uparrow \text{ 或 } I_L \downarrow \rightarrow U_o \uparrow \rightarrow U_F \uparrow \rightarrow U_{id} \downarrow \rightarrow U_{BE} \downarrow \rightarrow I_C \downarrow \rightarrow U_{CE} \uparrow \rightarrow U_o \downarrow$$

从图 8.1.2 可见,如果运算放大器 A 的同相端作为输入端,反相端作为反馈信号输入端, U_o 作为输出端,该系统实际上就是一个直流电压负反馈电路。因此对输出电压 U_o 有稳定的作用,其稳定度提高了 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 倍。使纹波及外部的干扰信号减小了 $|1 + \dot{A}\dot{F}|$ 倍。这就是串联型直流稳压电路稳压的实质所在。由此可见,要提高该系统的稳压性能,一是提高运放的开环电压放大倍数 A;二是提高反馈系数 ($F = \frac{R'_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$) 的数值。上述分析未考虑参考源的影响。实际上参考电压 U_z 是由稳压二极管 VD_z 提供的。稳压二极管 VD_z 会产生噪声,它的温度系数一般不为零,它输出的电压含有纹波成分,这些均会影响稳压时的性能指标。假设 VD_z 因某种原因有一个电压波动,其值为 ΔU_z ,则引起输出电压的波动为

$$\Delta U_o = \left(1 + \frac{R_1 + R'_2}{R_3 + R'_2}\right) \Delta U_z \quad (8.1.4)$$

因此,在要求高的稳压电路,其参考稳压源要采用精密稳压源。关于精密稳压源将在 8.2 节作详细介绍。

三、三端集成稳压器

随着集成技术的发展,稳压电路也迅速实现集成化。特别是三端集成稳压器,芯片只引出三个端子,分别接输入端、输出端和公共端,基本上不需外接元件,而且内部有限流保护、过热保护和过压保护电路,使用十分安全、方便。

1. 三端集成稳压器的组成

三端集成稳压器的组成如图 8.1.3 所示。电路内部实际上包括了串联型直流稳压电路的各个组成部分,另外,加上了保护电路和启动电路。在 WT800 系列三端集成稳压器中,已将三种保护电路集成在芯片内部,它们是限流保护电路、过热保护电路和过压保护电路。启动电路的作用是在刚接通直流输入电压时,使调整管、放大器和基准电源等建立起各自的工作电流,而当稳压电路正常工作时启动电路被断开,以免影响稳压电路的性能。

2. 三端集成稳压器的分类及特点

三端集成稳压器分固定式、可调式两大类,其分类详见表 8.1.1。