



普通高等教育“十三五”规划教材
电子设计系列规划教材

模拟电子设计导论

◎ 杨艳 傅强 著

中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十三五”规划教材
电子设计系列规划教材

模拟电子设计导论

杨 艳 傅 强 著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书适合作为模电翻转课堂和电子设计竞赛培训的教材,立足于电子系统设计,基于TI模拟技术及MCU平台,共8章4个附录,主要内容包括:TINA-TI仿真软件应用基础、模拟电路基础知识、晶体管电路设计、运放应用基础、电源管理、单片机编程基础知识、综合实验平台设计、项目实验例程等。本书将基础理论、综合实验、设计理念有机结合,是一本对读者来说真正“好用”的指导书,本书配套电子课件、实验参考例程等。

本书可作为高等学校电子类专业模电、电子设计等相关课程本科和研究生的教材,适合作为翻转课堂等创新教学方式下课程的教材,也可供在校大学生电子设计竞赛及创新活动培训用,也可用于资历尚浅的电子设计从业人员亡羊补牢之用。

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

模拟电子设计导论 / 杨艳, 傅强著. — 北京: 电子工业出版社, 2016.3

电子设计系列规划教材

ISBN 978-7-121-27726-9

I. ①模… II. ①杨… ②傅… III. ①电子电路—电路设计—高等学校—教材 IV. ①TN702

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第287205号

策划编辑: 王羽佳

责任编辑: 王晓庆

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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: 787×1092 1/16 印张: 18 字数: 520千字

版 次: 2016年3月第1版

印 次: 2016年3月第1次印刷

印 数: 3000册 定价: 45.00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 zltz@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

中小学教师教育培养学生的优劣，完全取决于学生的考试成绩。大学教师的情况则完全不同，考试变得毫无压力，困难的是如何让学生成为对社会有益的人。一天，一名研究生问，5V/2A 的适配器插在 5V/1A 的用电器上，会不会把用电器烧了；又有一天，一群学生聚在一起看网上一个视频，所有人都对视频中所谓 30s 充满手机电池的伪科学深信不疑。这些真实发生的事情促使我们反思在模拟电路教学中遇到的问题，应该去做点什么，不求学生能够为人类做出多大贡献，起码能够向周围人科普一定的专业知识、与伪科学做适当的斗争。

模拟电路是公认的难教难学，但在以往培训学生参加电子设计竞赛的过程中，大部分学生对于能讲明白道理的模拟电路知识点还是比较感兴趣的，并不抗拒学习，这也许是因为模拟技术更贴近自然规律的缘故。本书对不超出作者能力水平，学生通过自学能够掌握的部分模拟知识进行讲解，全书分为 8 章和 4 个附录，内容和结构具备以下特点：

1. 重视仿真软件的作用。基于免费的 TINA-TI 仿真软件，对于书中大多数模拟电路知识点均匹配仿真电路加以验证，并提供仿真源文件与仿真波形源图。

2. 独立的模拟电路基础知识章节。在模拟电路中，有一些重要且内容独立的知识点，单独将这些知识点讲解，将有助于纠正学习中可能产生的偏差。

3. 晶体管电路设计侧重见多识广。虽然现在单纯的晶体管电路已经较少采用，但是通晓晶体管电路的基本原理，并见识一定量的电路拓扑是非常必要的。

4. 运放电路讲究实用性。运放电路是模拟电路应用的重点，不仅讲解了由理想运放、通用运放构成的基本运算放大电路，还大量引入 TI 公司实际的运放和特殊运放，通过大量仿真分析运放各参数对电路性能的影响。

5. 电源知识学习注重深度。以往经验表明，浅显宽泛的电源知识学习对于学生掌握电源设计方法帮助不大。电源的学习应有一定深度，详细讲解了 MOSFET 的参数和驱动原理，详细讨论元器件参数、控制参数对斩波电路性能的影响。

6. 综合实验平台设计力争简易、经典、全面。选取有代表性的晶体管放大电路、运放电路和电源电路，覆盖面广但不复杂，以验证知识点为目的。

7. 与 TI LaunchPad 单片机平台相结合，实验例程功能完整有趣。在一般模拟电子书籍中，为避免“跑题”，所举设计实例都是纯模拟电路，这直接导致电路在功能上枯燥无味且脱离生产生活实际。尺有所短，寸有所长，虽然模拟技术有其无可替代的场合，但数字技术在很多方面都有特殊的优势，实用的电子产品大都是模拟与数字相结合的产物。本书的设计实例部分将模拟电路与单片机编程相结合，真实还原两者在实际应用中的分工，最终构成具备完整功能的十几种电路。例程代码结构清晰，可移植性和添加性强。对于理解例程代码所需的 C 语言编程知识也单独进行了讲解。

8. 复杂但有用的知识单独放在附录部分。振荡和噪声两个模拟知识点有用、复杂且内容独立，所以放在附录中供后期学习。例程代码中的难点图形库和文件系统也作为附录单独讲解。

需要单独说明的是书中电路图的标注。除综合实验平台的电路设计外，全书大部分是使用 TINA-TI 软件进行电路原理图绘制和仿真的。TINA-TI 中有许多默认标注是不太符合日常习惯的，例如，所有元器件符号不带角标（如只能是 R1，而不能是 R_1 ），所有元器件数值不带单位（如电阻标 1m 代表 $1\text{m}\Omega$ ，

电池标 5 代表 5V)。为了使大家在对照使用 TINA-TI 仿真软件中不产生误解,全书未对 TINA-TI 的电路标注做修改,但书中正文部分均使用角标化的元器件符号。对于仿真软件默认的命名,如 VG 表示电压发生器,在正文首次出现时均加以说明。

本书配套电子课件、实验参考例程等,请登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)注册下载。

全书的结构和内容几经删改,写作的时间也从预计的 4 个月延长到差不多 1 年,在 2014 年 11 月基本定稿后,广泛征求同行意见又给部分学生试用一学期反馈修改后,才最终交付出版。TI 的老前辈 Bruce Trump 写过的一段话最能描述本书写完后的感慨:“I found myself learning more about topics I thought I knew pretty well. It reminds me of what an old mentor told me—if you want to really learn something, **teach it!**”(“我发现我学到了很多,而这些我以前以为我已经掌握得很好了。这让我想起了我的导师跟我说过的一句话:如果你真的想学什么,就去讲述或传授它。”)

在本书写作过程中, TI 中国大学计划部始终给予了大力的支持,在此表示衷心的感谢。研究生王景兵和周道亮承担了实验例程代码的编写,李兴旺校对了全文并绘制了插图。

由于作者水平所限,书中误漏之处难免,敬请广大读者批评指正。

作者

2016 年 1 月于青岛大学

目 录

第 1 章 TINA-TI 仿真软件应用基础	1	2.5.2 电容的等效模型	32
1.1 运放缓冲器电路分析	1	2.6 输入阻抗与输出阻抗	34
1.1.1 电路搭建	1	2.7 电路中的带宽	35
1.1.2 直流特性分析	2	2.8 电子元器件的温度特性	36
1.1.3 交流特性分析	3	2.8.1 电阻的温度特性	36
1.1.4 瞬时现象分析	4	2.8.2 电容的温度特性	37
1.1.5 稳定输出的缓冲器电路	5	2.8.3 半导体元器件的温度特性	37
1.1.6 小结	6	2.9 热阻与散热	38
1.2 傅里叶分析	6	2.9.1 管芯温度与环境温度	38
1.3 直流参数扫描	9	2.9.2 热阻的计算	38
1.4 数学分析工具	10	2.9.3 常见封装及散热器的热阻	39
1.5 可编程电源	12	2.10 阻抗匹配	40
1.6 时间开关与开关电源电路	13	2.10.1 传输线的特性阻抗	40
1.7 添加元器件模型	14	2.10.2 阻抗匹配的方法	41
第 2 章 模拟电路基础知识	16	2.11 功率因数	41
2.1 电压源与电流源	16	2.11.1 有效值	42
2.1.1 电压源的本质	16	2.11.2 位移因数	42
2.1.2 电压源的内阻	17	2.11.3 基波因数	44
2.1.3 电流源的本质	19	2.11.4 功率因数的三个疑问	46
2.1.4 电流源的内阻	20	2.11.5 整流电路的功率因数	47
2.1.5 电源适配器 5V/2A	20	2.11.6 小结	48
2.1.6 超级充电器	20	第 3 章 晶体管电路设计	49
2.2 电子器件的本质	21	3.1 二极管电路	49
2.2.1 电阻	21	3.1.1 二极管的一般性质	49
2.2.2 电容	22	3.1.2 二极管的伏安特性	49
2.2.3 电感	23	3.1.3 二极管的动态特性	50
2.3 阻抗与滤波器	25	3.1.4 快恢复二极管与肖特基二极管	51
2.3.1 元器件的阻抗	25	3.1.5 稳压二极管	51
2.3.2 滤波器原理	26	3.1.6 发光二极管	52
2.4 波特图与零、极点	27	3.2 三极管基本特性	52
2.4.1 幅频与相频特性曲线	27	3.3 三极管恒流源电路	52
2.4.2 多阶滤波器的交流传输特性	28	3.3.1 恒流源放电电路	53
2.4.3 零点与极点	30	3.3.2 恒流源充电电路	54
2.5 电阻、电容的实际等效模型	31	3.3.3 小结	55
2.5.1 电阻的高频等效模型	32	3.4 共射放大电路	55

3.4.1	共射放大电路一般性质	55	4.2.3	输入阻抗与偏置电流	103
3.4.2	放大电路的直流偏移	56	4.2.4	失调电压与零漂移放大器	105
3.4.3	共射放大电路的饱和现象	57	4.2.5	电流反馈运算放大器	106
3.4.4	共射放大电路的截止现象	58	4.3	特殊运算放大器	106
3.4.5	电压源的交流等电位	59	4.3.1	差分放大器	107
3.4.6	共射放大电路的输入阻抗和 输出阻抗	59	4.3.2	仪表放大器	109
3.4.7	共射放大电路电路的密勒效应	60	4.3.3	电流检测放大器	111
3.4.8	共射放大电路的设计	60	4.3.4	可变增益放大器	114
3.4.9	共射放大电路的扩展电路	63	4.3.5	电压频率转换器	116
3.5	差分放大电路	68	4.3.6	隔离放大器	117
3.6	共集放大电路	70	4.3.7	音频功率放大器	118
3.6.1	射极跟随器	71	4.4	有源滤波器	120
3.6.2	射随电路的输入/输出阻抗	71	4.4.1	简单有源滤波器	120
3.6.3	射随电路的带宽	72	4.4.2	有源滤波器设计软件	123
3.6.4	甲类功率放大电路	72	4.4.3	Sallen-Key 滤波器的高频馈通 现象	126
3.6.5	乙类功率放大电路	74	4.4.4	运放带宽对滤波器的影响	128
3.6.6	甲乙类功率放大电路	75	第 5 章	电源管理	130
3.6.7	共射共集组合放大电路	76	5.1	电力 MOSFET 开关	130
3.7	共基放大电路	77	5.1.1	电力 MOSFET 的工作原理	130
3.7.1	基本共基放大电路	77	5.1.2	导通电阻	131
3.7.2	共基放大电路的输入/输出阻抗	78	5.1.3	额定电压	131
3.7.3	共基放大电路的频率特性	78	5.1.4	额定电流	132
3.7.4	共基共射放大电路	79	5.1.5	开关时间	133
3.8	其他放大电路	81	5.1.6	MOSFET 开关的驱动	135
3.8.1	达林顿电路	81	5.1.7	同步整流	137
3.8.2	推挽放大电路	81	5.2	斩波电路	138
3.8.3	直接耦合多级放大电路	82	5.2.1	Buck 降压斩波电路	138
第 4 章	运放应用基础	84	5.2.2	电荷泵电路	142
4.1	基本运算放大电路	84	5.2.3	Boost 升压斩波电路	144
4.1.1	反相比例运算电路	84	5.2.4	升降压斩波电路	149
4.1.2	同相比例运算电路	85	5.2.5	Cuk 斩波电路	151
4.1.3	加法运算电路	87	5.2.6	Sepic 和 Zeta 斩波电路	153
4.1.4	减法运算电路	89	5.2.7	电流可逆斩波电路	153
4.1.5	积分运算电路	93	5.3	桥式电路	158
4.1.6	微分运算电路	95	5.3.1	全桥电路	158
4.1.7	PID 运算放大电路	96	5.3.2	半桥电路	159
4.2	实际运算放大电路	98	5.4	驱动的隔离	160
4.2.1	轨至轨与运放供电	99	5.4.1	驱动电平的浮动现象	160
4.2.2	运放的带宽与压摆率	100	5.4.2	自举升压驱动	160

5.4.3	P 型管驱动	161	7.8	晶体管图示仪板	208
第 6 章	单片机编程基础知识	163	7.8.1	DAC 双极性输出原理	209
6.1	C99 数据类型	163	7.8.2	HowLand 压控电流源	209
6.2	匈牙利命名法	163	7.8.3	电流电压检测与缓冲器	210
6.3	C 语言高级编程	164	7.8.4	图示仪绘图原理	211
6.3.1	结构体	165	第 8 章	用户实验例程	212
6.3.2	联合体	167	8.1	菜单框架	212
6.3.3	枚举	169	8.1.1	菜单程序软件流程图	212
6.3.4	指针	169	8.1.2	全局变量	213
第 7 章	综合实验平台设计	173	8.1.3	Subject 结构体	213
7.1	概述	173	8.1.4	Demo_OS() 函数	214
7.2	开关跳线及兼容性说明	174	8.1.5	菜单演示实验	216
7.2.1	LaunchPad 单片机开发板兼容	174	8.2	直流电机反馈控制实验	216
7.2.2	电机选择开关	175	8.2.1	实验原理图	216
7.2.3	DAC 输出及蓝牙兼容开关	175	8.2.2	软件流程图	217
7.3	核心板	176	8.2.3	实验步骤	218
7.3.1	人机交互单元	176	8.2.4	实验现象	218
7.3.2	开关电源实验单元	180	8.3	步进电机开环控制实验	219
7.3.3	DAC 单元	184	8.3.1	实验原理图	219
7.4	超声波板	184	8.3.2	软件流程图	219
7.4.1	超声波发射	184	8.3.3	实验步骤	220
7.4.2	超声波接收	186	8.3.4	实验现象	221
7.4.3	超声波测距范围	188	8.4	超声波测距实验	222
7.4.4	放大电路的自激振荡实例	190	8.4.1	实验原理图	222
7.4.5	有源滤波电路	191	8.4.2	软件流程图	222
7.5	音频称重板	192	8.4.3	实验步骤	223
7.5.1	驻极体录音	193	8.4.4	实验现象	224
7.5.2	数字音频存储	195	8.5	白光 LED 驱动实验	225
7.5.3	电源线耦合干扰实例	195	8.5.1	实验原理图	225
7.5.4	数字音频播放	196	8.5.2	软件流程图	225
7.5.5	称重传感器电路	198	8.5.3	实验步骤	226
7.6	电机板	200	8.5.4	实验现象	226
7.6.1	双 H 桥驱动	200	8.6	三轴加速度传感器实验	226
7.6.2	直流电机控制	201	8.6.1	实验原理图	226
7.6.3	光电测速	202	8.6.2	软件流程图	227
7.6.4	步进电机控制	204	8.6.3	实验步骤	228
7.7	传感器板	205	8.6.4	实验现象	228
7.7.1	光敏电阻用于自动背光控制	205	8.7	红外解码实验	228
7.7.2	红外一体接收传感器	206	8.7.1	实验原理图	228
7.7.3	三轴加速度传感器	207	8.7.2	软件流程图	229

8.7.3	实验步骤	230	8.10.3	实验步骤	237
8.7.4	实验现象	230	8.10.4	实验现象	237
8.8	录放机实验	230	8.11	播放器实验	238
8.8.1	实验原理图	230	8.12	杂项功能实验	239
8.8.2	软件流程图	231	8.12.1	SPWM 滤波实验	240
8.8.3	实验步骤现象	232	8.12.2	触摸按键实验	240
8.8.4	实验现象	232	8.12.3	DAC 双极性输出实验	242
8.9	称重传感器实验	233	附录 A	运放电路的稳定性	243
8.9.1	实验原理图	233	附录 B	运放的噪声计算	255
8.9.2	软件流程图	233	附录 C	ST7567 与图形库	261
8.9.3	实验步骤	234	附录 D	SD 卡与文件系统	269
8.9.4	实验现象	234	参考文献		279
8.10	晶体管图示仪实验	235			
8.10.1	实验原理图	235			
8.10.2	软件流程图	236			

第1章 TINA-TI 仿真软件应用基础

无论多么精心地设计模拟电路的实验板，能够做实验的知识点都是有限的。对于 EE 专业的学生来说，有大量成熟的专业电路仿真软件可以使用是十分幸运的，它可以大大提高学习的效率和兴趣。如果不利用电路仿真软件来学习和设计模拟电路，将是非常悲哀的一件事。

在浩如烟海的电路仿真软件中，适用于初学者的免费软件不多。其中，TINA-TI 是由世界上最大的模拟器件生产商美国德州仪器公司与 DesignSoft 公司共同开发的免费模拟电路仿真软件，可以认为是全功能收费仿真软件 TINA 的精简版。虽然不能说 TINA-TI 的功能是最全的，但是它对 TI 公司器件电路仿真的支持是最好的。并且 TINA-TI 是基于 SPICE 技术的仿真软件，这与其他仿真软件在本质上是一致的，学会使用 TINA-TI 也将更容易地上手其他仿真软件。

常规 TINA-TI 知识，例如如何下载、如何安装、版本有何改进，可以参阅德州仪器网站，本章主要是通过 7 个例子来说明如何使用 TINA-TI：

- 1) 运放缓冲器电路分析；
- 2) 傅里叶分析；
- 3) 直流参数扫描；
- 4) 数学分析工具；
- 5) 可编程电源；
- 6) 时间开关与开关电源电路；
- 7) 添加元器件模型。

1.1 运放缓冲器电路分析

本节将仿真一个带电容负载的运放缓冲器电路。通过仿真该电路，学习电路元器件搭建、电气规则检查、直流特性分析、交流特性分析、暂态分析，以及该缓冲器电路的优化设计。

1.1.1 电路搭建

首先按图 1.1.1 所示搭建一个由运放构成的缓冲器电路，负载设定为 $1\mu\text{F}$ 的电容。

电路的搭建包括运算放大器 $\mu\text{A}741$ 、信号源 VG_1 （仿真软件对电压发生器 Voltage Generator 默认命名为 VG）、电源 V_1 和 V_2 、负载电容 C_L 及电压探头 V_{OUT} ，所有元器件的名称和属性均可通过双击该元器件来进行修改。

1) $\mu\text{A}741$ 是模拟电路中非常经典的一个运放，在条件允许的情况下，总是选择实际运放模型而不是理想运放来仿真电路。在中文版的 TINA-TI 中，单击“制造商模型”就可以选择德州仪器 (TI) 和国家半导体 (NS, 已被德州仪器收购) 的 11 类器件模型，如图 1.1.2 所示。从左至右依次为运算放大器、差分（输入）放大器、全差分（输出）放大器、仪表

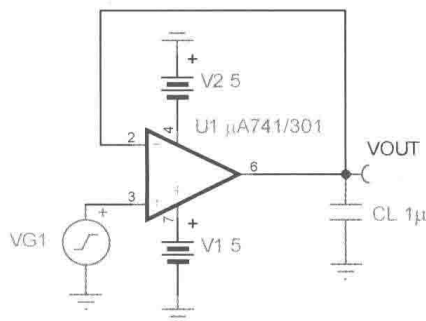


图 1.1.1 缓冲器电路

放大器、比较器、基准源、缓冲器、电流检测放大器、开关电源、数据转换器和其他元器件。 $\mu\text{A}741$ 属于“运算放大器”子项中的元器件。

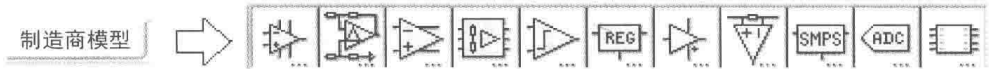


图 1.1.2 器件模型分类

2) 如图 1.1.3 所示, 对于信号源 VG_1 , 需要设定信号源的波形种类为“方波”, 幅值为 100mV , 频率为 1kHz , 上升/下降时间默认为 1ns 即可。

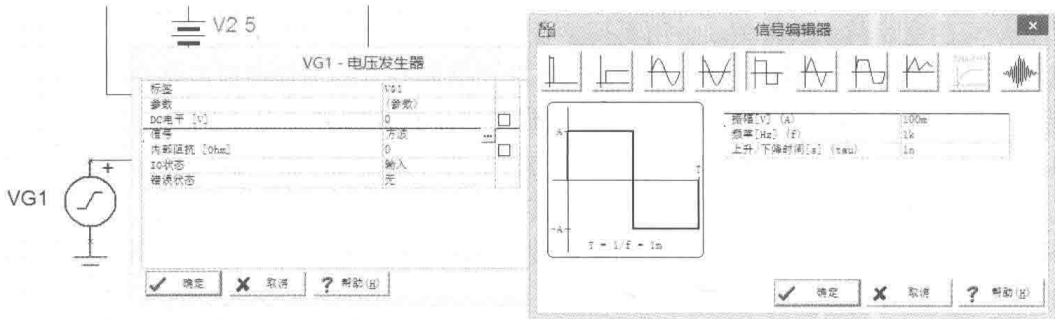


图 1.1.3 信号源参数设定

3) 电源 V_1 和 V_2 使用默认的 5V 即可, 如需改动参数, 也可双击电池符号加以调整。

4) 负载电容 C_L 在“基本”元器件库中, 采用电容理想模型就可以了, 即使以后需要考虑电容 ESR 时, 也不妨外部直接串联电阻, 这样更直观。

5) 电压探头 V_{OUT} 是从“仪表”栏中选取的, 将来在电路仿真分析时, 这就是一个可观测的节点。

1.1.2 直流特性分析

作为仿真软件来说, 任何节点和支路的参数都是已经计算出来了的, 至于是否需要显示出来就看用户的需求了。

在中文版 TINA-TI 菜单栏中单击“分析”→“直流分析”, 可以得到 4 个选项, 分别为“计算节点电压”、“直流结果表”、“直流传输特性”、“温度分析”。

1) 计算节点电压时, 可以显示电压探头位置的直流电压值。图 1.1.4 所示的 V_{OUT} 应该是交流信号, 所以它的直流电压值仅为 $11.18\mu\text{V}$ 。



图 1.1.4 计算节点电压

2) 直流结果表将电路中的全部直流参数, 包括直流电压和直流电流全部显示出来。如图 1.1.5 所示, 软件会自动标注所有回路和节点名称。如图 1.1.5 所示, 电路中不等电压的节点仅有 $0/1/2/3/V_{\text{OUT}}$ 这 5 个, 仿真软件根据元器件名称和因连线产生的节点编号, 将全部的直流参数以列表的形式显示出来。列表内容很长, 例如, 还包含有芯片内部的一些电流电压参数, 这些可以不看, 一般只需看那些关心的参数即可。

3) 直流传输特性分析是非常有用的功能, 用于研究输入直流参数变化时, 输出的直流参数如何变化。本例用不上这个功能, 在后续的例子中会详细介绍。

4) 温度分析是研究温度对半导体器件的影响的, 本书中将不涉及该功能的讨论。

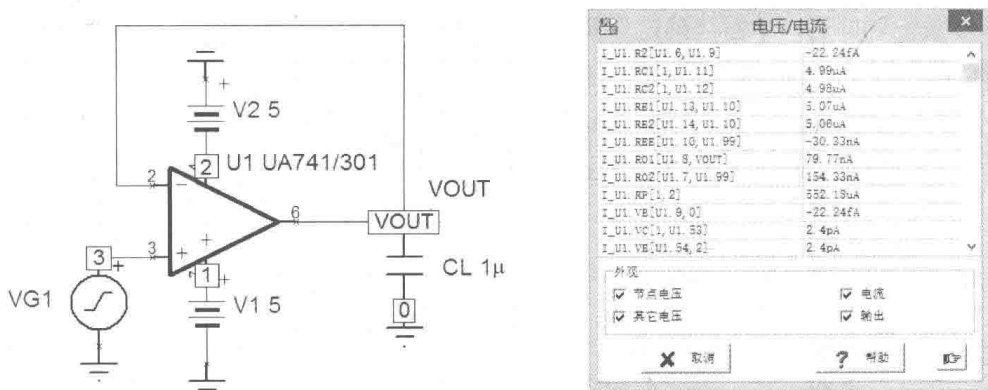


图 1.1.5 直流结果表

1.1.3 交流特性分析

在中文版 TINA-TI 菜单栏中单击“分析”→“交流分析”，可以得到 4 个选项，分别为“计算节点电压”、“交流结果表”、“交流传输特性”。“计算节点电压”、“交流结果表”都与直流特性分析类似，这里详细介绍“交流传输特性”。

1) 所谓“交流传输特性”，就是改变信号源的频率，考查电路的输出变化情况，相当于提供了一个扫频信号源，属于频谱分析的范畴。

2) 选择“交流传输特性”选项后，得到图 1.1.6 所示的设置窗口。我们需要配置信号源的起止频率、采样数、扫描类型（线性扫描/对数扫描）及需要观测的数据。

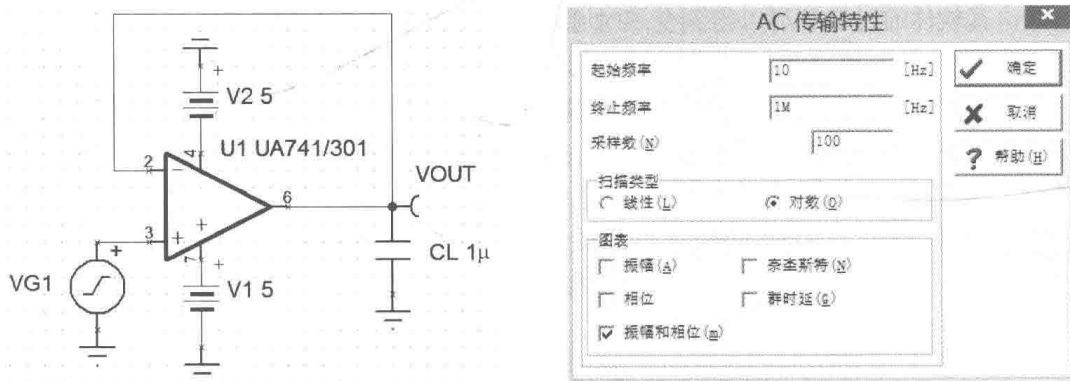


图 1.1.6 交流传输特性设置窗口

3) 对于起止频率的选择，应基于电路的实际带宽来设定。如果频率起止范围设定过小，会看不出交流传输特性的变化，换句话说，就是在该频段内，特性无明显变化。如果频率起止范围过大，重要的频率点信息就显示不明显。在本例中，默认使用 10Hz~1MHz 的频率范围，超过 μ A741 运放实际带宽若干倍即可。

4) 采样数的设定适量即可。采样数越多，仿真计算所需的时间就越长，默认 100 个采样点，所得到的波形就不影响观察效果了。

5) 扫描类型方面，一般放大器的应用中都选择对数扫描，这样才能“变化明显”。

6) 在图表选项中，可以选择观测振幅、相位、群时延等参数随信号频率的变化图表，即频率作为横坐标，上述参数作为纵坐标的图表。在本例中，我们选择同时显示振幅和相位，实际就是幅频特性和相频特性曲线。

7) 全部参数设置好后, 单击“确定”就可以得到图 1.1.7 所示的幅频特性和相频特性曲线。双击曲线的横坐标或纵坐标, 可以修改显示的“刻度尺”。

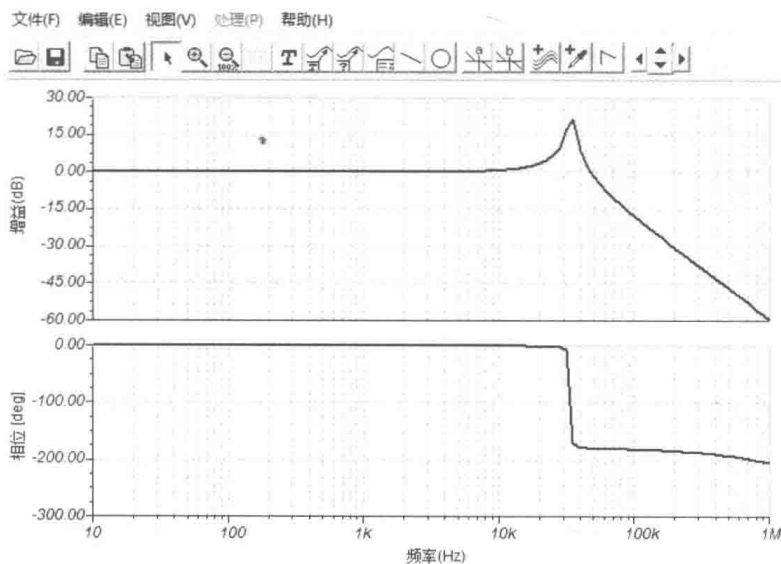


图 1.1.7 幅频特性和相频特性曲线

1.1.4 瞬时现象分析

所谓的瞬时现象就是时域波形, 也就是电路参数随时间的变化情况。示波器就是观测时域波形的工具, 电路仿真软件通过计算可以得到全部时域数据, 直接显示成图表即可。

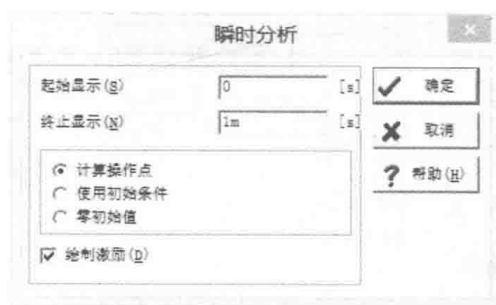


图 1.1.8 瞬时分折设置

1) 单击“分析”→“交流分析”→“瞬时分折”, 可得到瞬时分折的设定窗口, 如图 1.1.8 所示。

2) 对于瞬时分折, 主要是设置起止时间。设定的原则就是对于周期信号能观测出完整周期, 对于非稳定信号, 则酌情考查信号的建立过程, 比如待信号稳定后再“观测”(起始显示不从 0 开始)。

3) 本例中, 信号源的频率设定为 1kHz, 所以时间设定 2ms 可以考查两个完整周期, 起始时间可以从 0 开始, 图 1.1.9 所示即为瞬时分折图表。

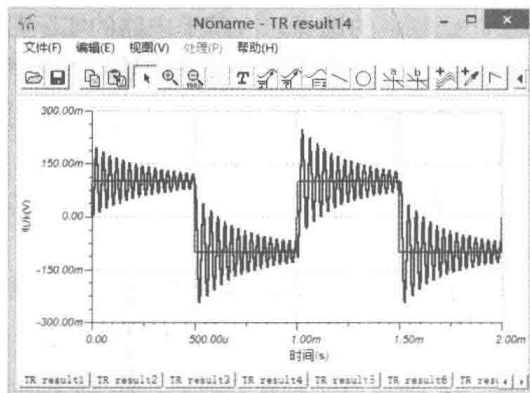
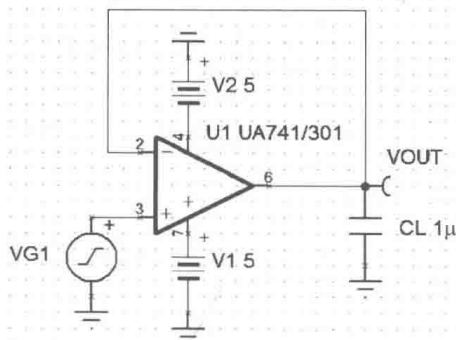


图 1.1.9 缓冲器电路的瞬时分折

4) 图 1.1.9 所示的信号波形和输出波形是公用坐标轴的, 有些情况下不便于观察。我们可以单击“视图”→“分离曲线”可将输入/输出曲线分离, 并通过双击坐标轴, 将两个波形的纵坐标轴均改为 $-300\sim 300\text{mV}$, 得到图 1.1.10 所示的波形。

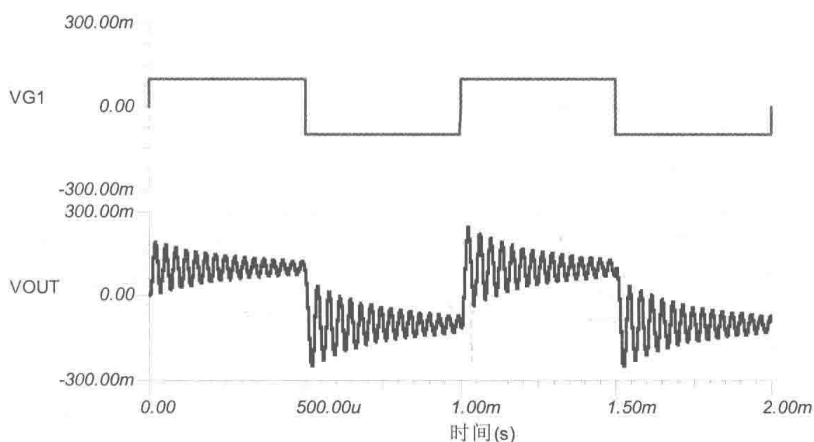


图 1.1.10 输入/输出波形分离

5) 通过图 1.1.10 可以发现, 本来作为缓冲器的输出应该是与输入波形一致的, 但是实际输出波形产生了强烈的振荡 (俗称振铃), 这是由于 $1\mu\text{F}$ 的纯电容负载所导致的。具体振荡的原因在附录 A 中进行介绍, 本章节仅说明 TINA-TI 的常用仿真功能。

1.1.5 稳定输出的缓冲器电路

通过以上 1.1.4 节的分析, 纯电容负载不可避免地会带来振铃现象, 那么消除振铃的方法就是为负载串联电阻, 以改变“纯电容”负载。本节内容不具体解释消除振铃的原理 (可见附录 A), 本节的主要目的是说明电路仿真软件确实能在很大程度上帮助我们设计电路。

1) 如图 1.1.11 所示, 给负载电容 C_L 串联上负载电阻 R_L , 为了避免大幅度地改变负载特性, 先将 R_L 的值设定为 1Ω 。

2) “分析”→“交流分析”→“瞬时现象”, 参数设置与前面小节相同, 确定后得到图 1.1.12 所示的波形。串联 1Ω 电阻后, 振铃现象得到缓解。

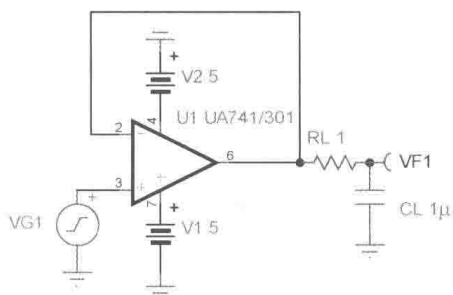


图 1.1.11 1Ω 串联电阻负载

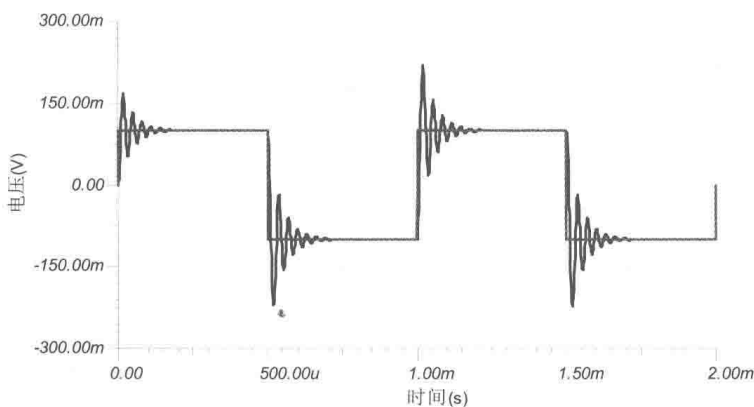
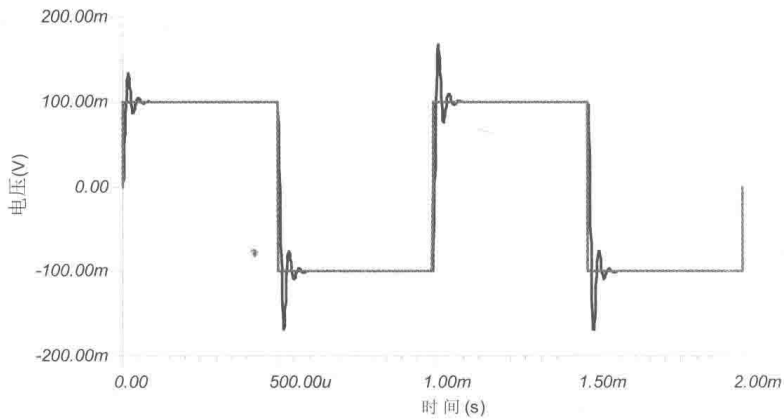


图 1.1.12 1Ω 电阻负载时的振铃

3) 修改 R_L 的值为 3Ω , 重新绘制“瞬时现象”波形。如图 1.1.13 所示, 振铃现象进一步改善, 但仍然存在振铃。

图 1.1.13 3Ω 电阻负载时的振铃

4) 修改 R_L 的值为 8Ω ，重新绘制“瞬时现象”波形。单击“视图”→“分离曲线”，修改坐标轴刻度范围（ $-200\sim 200\text{mV}$ ）后可得图 1.1.14 所示的波形，振铃现象基本消失，得到一个稳定的缓冲器电路。

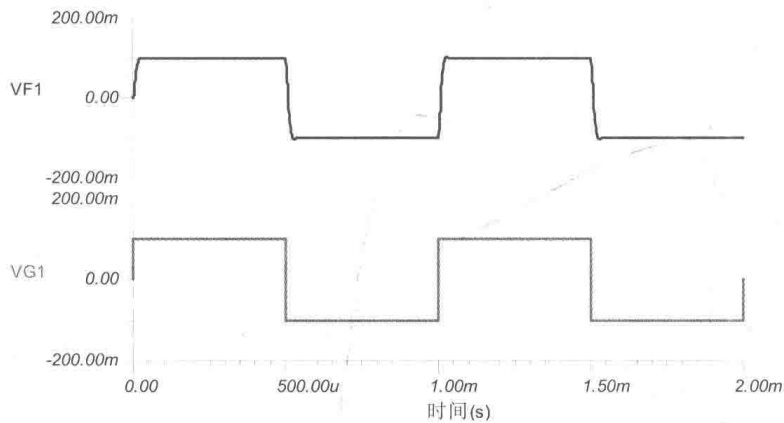


图 1.1.14 稳定的缓冲器时域波形

1.1.6 小结

本节通过一个由运放构成的缓冲器电路，来说明电路仿真软件的功能，与单纯依靠书本学习电路知识不同，仿真软件具备如下优点：

- 1) 对电路的参数定量计算快捷准确；
- 2) 不仅能分析学习电路的理想情况，还可以通过元器件模型，在很大程度上反映真实电路性质；
- 3) 修改电路参数方便，可以协助修正电路参数；
- 4) 成本“低廉”，无损坏器件及人身伤害的风险。

1.2 傅里叶分析

通过 1.1 节的学习，我们掌握了基本的 TINA-TI 软件的使用方法。本节开始将介绍 TINA-TI 的一些其他有用功能。

傅里叶分析主要用于频域分析，如果读者只用过示波器而没用过频谱仪的话，可以通过下面简短的介绍来了解什么是时域分析和频域分析。

1) 如图 1.2.1 所示, 如果把空间坐标系分成时间、频率和幅值(功率)三个轴, 取时间和幅度作图, 得到的就是时域波形(示波器); 取频率和幅度作图, 就得到频域波形(频谱仪)。

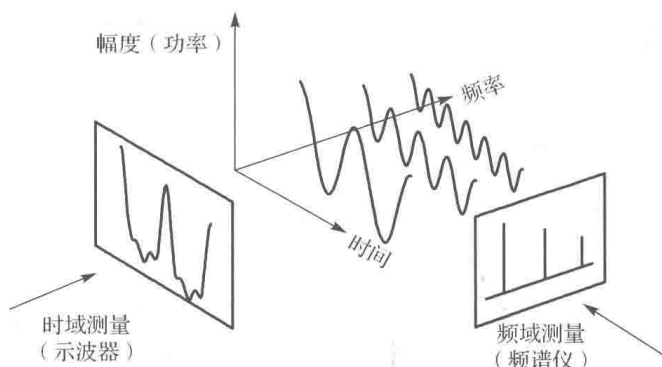


图 1.2.1 时域与频域的区别

2) 时域波形和频域波形都可以用来描述同一信号, 但是侧重点不一样。例如, 我们最熟悉的示波器可以观察信号的很多有用特征, 但是当需要用滤波器滤除信号中的无用成分时, 知道信号的频谱组成显然更有意义, 这样才能选择合适截止频率的滤波器。

对于仿真软件来说, 不用进一步讨论示波器的原理和频谱仪的原理差别, 只需学习如何使用 TINA-TI 的傅里叶分析功能即可。下面将用 TINA-TI 软件构造一个混频信号, 然后再用傅里叶分析分解出该信号的频谱组成。

1) 式 (1.2.1) 为锯齿波的傅里叶分解式。

$$x(t) = \frac{2V_{\text{peak}}}{\pi} \left(\sin \omega_0 t - \frac{1}{2} \sin 2\omega_0 t + \frac{1}{3} \sin 3\omega_0 t - \frac{1}{4} \sin 4\omega_0 t + \dots \right) \quad (1.2.1)$$

2) 根据式 (1.2.1) 可以构造出锯齿波, 如图 1.2.2 所示。利用运放的同相求和电路把 4 路信号叠加, 信号源 $VG_1 \sim VG_4$ 的频率、幅值和相位参数设定按图上标定设置。根据运算放大电路的特性及运用“叠加原理”进行计算, 图 1.2.2 中 $VG_1 \sim VG_4$ 的信号相当于幅值衰减到原来的五分之一再进行叠加。有关电路计算中的叠加原理非常有用, 请自行阅读。

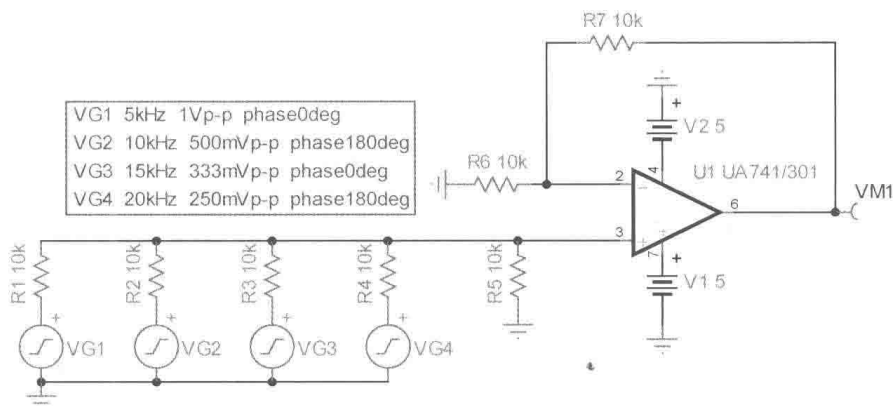


图 1.2.2 合成锯齿波波形

3) 生成“瞬态现象”波形后, 将曲线分离开, 并修改纵坐标为统一的 $\pm 1V$ 后, 得到图 1.2.3 所示的波形。 $VG_1 \sim VG_4$ 的幅值依次从 $1V_{PP}$ 降低到 $0.25V_{PP}$, VG_1 和 VG_3 的相位为 0° , VG_2 和 VG_4 的相位为 180° 。这样的 4 个波形叠加后将生成近似锯齿波 VM_1 (Voltage Mixed)。

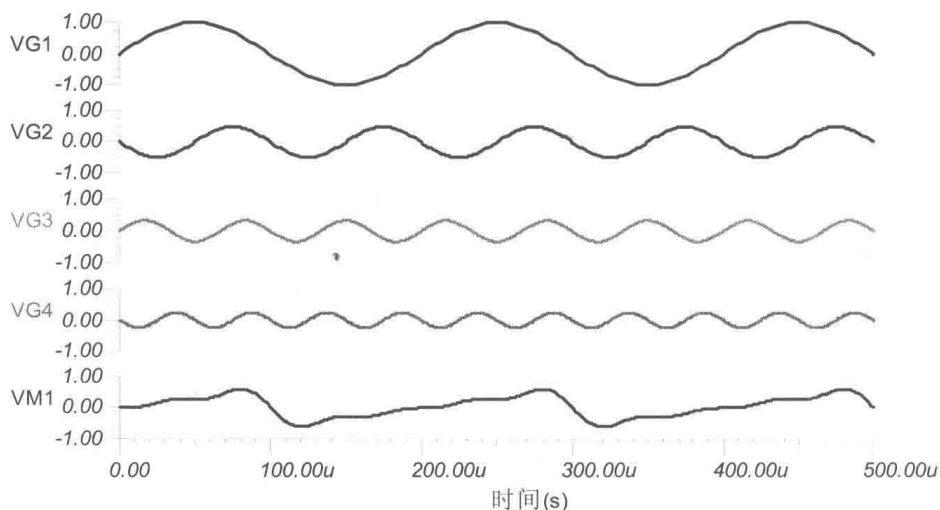


图 1.2.3 合成锯齿波及其正弦波分量时域波形

单击菜单栏的“分析”→“傅里叶分析”→“傅里叶级数”打开傅里叶级数设定窗口，如图 1.2.4 所示，有“基本频率”、“采样数”、“谐波数”、“输出”等参数需要配置。

- 1) 基本频率设定，对于构造的锯齿波来说，基频就是 5kHz。
- 2) 采样数的大小采用默认值即可，和仿真计算速度有关。
- 3) 谐波数设定，本例中的最大谐波为 20kHz，为基波 5kHz 的 4 倍，所以最大为 4 次谐波。为了将来图表显示效果好看，可定为显示 5 次谐波（5 次及以上谐波傅里叶分解的幅值应该近似为 0）。
- 4) 输出设定方面，就是选择待傅里叶分解的信号，在本例中只有 VM1 这个信号可供选择。
- 5) 单击“计算”后，可得傅里叶系数，如图 1.2.5 所示。0 次谐波和 5 次谐波的幅值近似为 0，基波与 3 次谐波的相位基本相同，2 次谐波与 4 次谐波的相位基本相同。奇数谐波与偶数谐波的相位差 180° 。

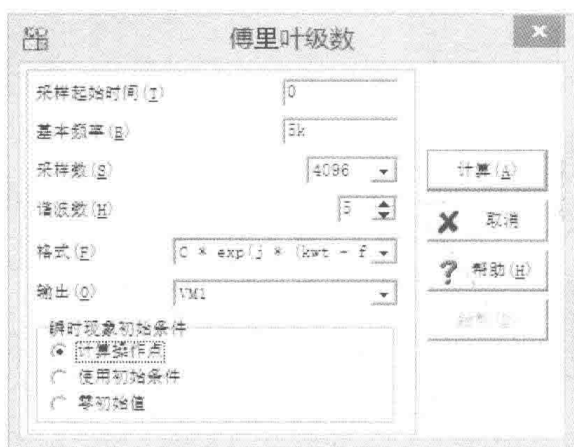


图 1.2.4 傅里叶级数设定

k	幅值 (C)	相位 (φ)
0.	502.65u	0
1.	199.97m	-90.53
2.	99.94m	89.93
3.	66.61m	-91.6
4.	49.98m	87.86
5.	1.99u	104.51

谐波失真: 65.008%

图 1.2.5 傅里叶分解系数

6) 继续单击“绘制”可得到频域曲线，如图 1.2.6 所示。图 1.2.6 的上部波形反映了合成锯齿波中不同频率成分的谐波幅值，与图 1.2.3 中原 VG₁~VG₄ 信号相比，幅值缩小到原来的五分之一，与运算放大电路的理论值相符。下半部分波形是各频率分量的相位，也与实际情况相符。