

CRC Press
Taylor & Francis Group

仿客+

PSpice和MATLAB

综合电路仿真与分析

(原书第2版)

PSpICE and MATLAB for Electronics:
An Integrated Approach, Second Edition

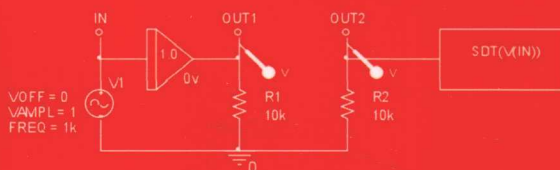
[美] 约翰·奥凯尔·阿提拉 (John Okyere Attia) 著

张东辉 周龙 邓卫 译

本书每章实例均附带PSpice和MATLAB仿真程序，读者可以将理论计算、实际设计和仿真程序相结合，更好地理解如何在实际电路仿真和分析的过程中将PSpice的强大电路仿真功能和MATLAB强劲的数学处理能力进行联合。

● 登录机械工业出版社官方网站www.cmpbook.com并注册会员账号

● 会员登录后，直接进入图书展示区，在查询图书下方输入书名，进入相关下载，获取源代码



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

仿客 +

PSpice 和 MATLAB 综合 电路仿真与分析

PSPICE and MATLAB for Electronics:
An Integrated Approach, Second Edition

(原书第 2 版)

[美] 约翰·奥凯尔·阿提拉 (John Okyere Attia) 著
张东辉 周 龙 邓 卫 译

机械工业出版社

PSPICE and MATLAB for Electronics: An Integrated Approach, Second Edition / by John Okyere Attia / ISBN: 9781420086584

Copyright © 2010 by CRC Press

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All rights reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下, CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版, 版权所有, 侵权必究。

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版授权由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01 - 2015 - 6623 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

PSpice 和 MATLAB 综合电路仿真与分析: 原书第 2 版/(美)阿提拉 (Attia, J. O.) 著; 张东辉, 周龙, 邓卫译. —北京: 机械工业出版社, 2016. 7

(仿客 +)

书名原文: PSPICE and MATLAB for Electronics: An Integrated Approach, Second Edition

ISBN 978-7-111-53715-1

I. ①P… II. ①阿…②张…③周…④邓… III. ①电子电路 - 计算机仿真 - 程序设计 - 应用软件②Matlab 软件 - 程序设计 IV. ①TM710②TP317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 095564 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 江婧婧 责任编辑: 江婧婧

责任校对: 陈 越 封面设计: 马精明

责任印制: 乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2016 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18.75 印张 · 358 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-53715-1

定价: 95.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010 - 88361066

读者购书热线: 010 - 68326294

010 - 88379203

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

本书是原书作者在从事电力电子教学与研究的基础上总结编写而成的。第一部分（第1~3章）为 PSpice 软件的基本功能介绍；第二部分（第4章和第5章）为 MATLAB®软件简单功能讲解；第三部分（第6~8章）主要利用 PSpice 和 MATLAB 软件对半导体器件特性进行探索，对电子电路和电路系统进行综合分析。本书实例均附带 PSpice 和 MATLAB 仿真程序，读者可从机械工业出版社官方网站 www.cmpbook.com 的本书相关页面获取配套仿真程序。

第一部分和第二部分适用于刚刚接触 PSpice 和 MATLAB 软件并且希望对其进行简单了解的学生和专业人员，第三部分适用于电子和电气工程专业学生及相关专业技术人员。另外，本书可为从事电力电子相关研究和应用的工程技术人员提供参考，也可作为高等院校相关专业学生的教材使用。



译 者 序

工欲善其事，必先利其器。在当今电子电路飞速发展的时代，使用哪种软件及如何使用软件对电路进行详尽、系统的分析显得尤为重要。

本书首先对电路行业的标志性软件 PSpice 进行讲解，主要包括直流分析、交流分析、瞬态分析、傅里叶分析和蒙特卡洛分析。另外对各类库文件尤其是 ABM 和 SPECIAL 库进行详细的讲解，以便读者能够更加灵活地应用数学表达式、数据表格、传递函数对模拟电路进行描述和仿真数据提取，以供 MATLAB 进行处理。

然后本书结合实例对 MATLAB® 软件的基本功能进行讲解，尤其是数据处理和数据分析功能。另外，还对 MATLAB 软件的绘图功能和程序编写进行了简单介绍。

最后本书结合电路实例，将 PSpice 的强大电路仿真功能和 MATLAB 的强劲数学处理能力进行联合，共同对电路进行综合分析，以便能够系统、彻底、合理地解决电路系统设计过程中遇到的问题。

本书思路创新，把 MATLAB 和 PSpice 两种软件综合在一起对电路进行分析，理论与实例相结合，源于实践用于实践，非常值得电路设计人员借鉴。

本书由张东辉、周龙、邓卫翻译。北方工业大学的毛鹏老师完成了全稿的校核工作。PSpice 仿真群 (336965207) 的如下仿友：陈明、曹珂杰、杜建兴、黄维笑、李少兵、刘亚辉、潘如政、王晓志、于刚、张东东、张远征、赵东生、张岳海、张志新等对本书的文字翻译和仿真程序校对付出了辛勤的汗水，在此表示衷心的感谢。

限于译者才疏学浅，加之时间仓促，难免出现翻译欠妥之处，恳请读者批评指正，在此表示诚挚感谢。

张东辉

2016 年 3 月

原 书 前 言

Spice 是电路仿真行业标准软件之一。该软件可实现直流分析、交流分析、瞬态分析、傅里叶分析和蒙特卡洛分析。另外, Spice 拥有非常丰富的元件模型库, 用户可以使用这些元件库对电路进行仿真分析与设计。PSpice 仿真软件由 Cadence 公司在 Spice 语言基础上进行设计加工而成。PSpice 软件包含模拟行为模型元件库, 用户可以利用数学表达式、数据表格、传递函数对模拟电路进行描述。

MATLAB[®] 软件主要用于矩阵计算, 该软件拥有大量的数据处理和数据分析函数。另外, MATLAB 软件还集成了强大的绘图功能。除此之外, MATLAB 还可以进行编程, 用户通过编写新模块 (m_files) 可以大大增强 MATLAB 的计算处理功能。

本书把 PSpice 的强大电路仿真功能和 MATLAB 的强劲数学处理能力相联合, 共同对电路进行综合分析。电子电路通常由元件模型和子电路构成, PSpice 可对其进行直流分析、交流分析、瞬态分析、傅里叶分析、温度分析和蒙特卡洛分析。然后, MATLAB 利用仿真数据进行元件参数计算、曲线拟合、数值积分、数值微分、统计分析及二维和三维图形绘制。

PSpice 软件拥有图形处理程序——PROBE, 利用该程序可以把仿真结果进行图形显示, 更加有利于用户对电路进行理解和分析。另外, PROBE 具有大量的内置函数, 可以对波形数据进行简单处理。然而, 与 MATLAB 相比, PSpice 的数据处理功能就微乎其微了。

编写本书的主要目的是向读者介绍 PSpice 电路仿真软件; 把简单、方便、实用的 MATLAB 数学处理工具引荐给读者; 引导读者利用 PSpice 和 MATLAB 对电路进行综合分析, 以解决电路系统设计过程中遇到的问题。

本书具有自己的特色, 它对 MATLAB 和 PSpice 两种软件进行详细介绍。另外, 本书把 PSpice 的强大电路仿真功能和 MATLAB 的强劲数学处理能力相联合, 共同解决电路系统中的设计问题。

读者

本书可供在校学生、专业工程师和相关技术人员使用。第一部分为 PSpice 软件的基本功能介绍。第二部分为 MATLAB[®] 软件简单功能讲解, 对于刚刚接触

MATLAB 软件并且希望对其进行简单了解的学生和专业人员非常适用。第三部分主要针对电子和电气工程专业学生及技术人员，他们可以使用 PSpice 和 MATLAB 对半导体器件特性进行探索，对电子电路和电路系统进行综合分析。

主要内容

本书第 1 版主要分为三部分。第一部分（第 1~3 章）主要介绍 PSpice 仿真软件。第 1 章为 OrCAD 原理图绘制，第 2 章为 PSpice 基本命令，第 3 章为 PSpice 高级功能。每章都结合具体的电路仿真分析实例对 PSpice 软件的相关功能进行详细讲解和分析。

第二部分（第 4、5 章）主要介绍 MATLAB[®] 软件。利用 MATLAB 对电路进行分析，并且对电子电路应用进行探索。建议读者在阅读第 1~5 章时，能够利用计算机完整地运行书中的仿真实例。亲手实践是学习 PSpice 和 MATLAB 的最佳途径。

第三部分包括第 6~8 章，主要讨论二极管、运算放大器和晶体管电路。重点讲解如何利用 PSpice 和 MATLAB 解决电子电路问题。结合大量的电路实例，展示 PSpice 和 MATLAB 对电路进行综合分析时强大的解决问题能力。本书每章都附有参考目录和习题，以供读者查阅和练习。

在本书第 2 版中，第 1 章讲解 OrCAD 原理图绘制。本版书籍把仿真电路的原理图绘制和 PSpice 文本编程集成在一起进行讲解。为了让读者能够更加容易地使用 OrCAD 软件，原理图绘制和仿真设置步骤均采用流程的形式，通俗易懂、简单直接。MATLAB 部分也增加了几项数据处理功能，每章都增加了仿真实例，另外，每章节的习题也进行了补充。最后，本书每章结尾的参考文献均进行了修订和更新。

MATLAB[®] 为 MathWorks 公司的注册商标。如有相关软件问题咨询，请联系：

The MathWorks, Inc.

3 Apple Hill Drive

Natick, MA 01760 - 2098 USA

Tel: 508 - 647 - 7000

Fax: 508 - 647 - 7001

E-mail: info@mathworks.com

Web: www.mathworks.com

致 谢

非常感谢 Monica Bibbs, Julian Farquharson 和 Rodrigo Lozano 对本书第 1 版所付出的辛勤汗水。特别感谢 Taylor & Francis 出版社的 Nora Konopka 编辑对本书的浓厚兴趣。再次感谢 Jill Jurgensen 先生对本书出版所做的大量工作。

作者简介

John Okyere Attia 博士是得克萨斯州普雷里维农业机械大学教授，并担任电气和计算机工程专业学术带头人。在过去的 28 年中，他一直教授研究生和本科生的电气和计算机工程等电子领域课程，主要包括电路分析、仪表系统、数字信号处理和超大规模集成电路设计。

John Okyere Attia 博士在休斯敦的得克萨斯州立大学获得电气工程博士学位；在加拿大多伦多大学获得硕士学位；在加纳克瓦米·恩克鲁玛科技大学获得本科学位。另外，John Okyere Attia 博士还在 AT&T 贝尔实验室和 3M 公司有过短暂的工作经历。

John Okyere Attia 博士已经撰写了 65 本出版物，并且在 CRC 出版社出版了《Electronics and Circuits Analysis Using MATLAB® Second Edition》书籍。John Okyere Attia 博士的研究方向主要包括辐射环境下的创新电子电路设计、信号处理及辐射测试。

John Okyere Attia 博士曾两次获得优秀教学奖。并且同时为 Sigma Xi、Tau Beta Pi、Kappa Alpha Kappa 和 Eta Kappa Nu 的注册会员。另外，John Okyere Attia 博士也是得克萨斯州已注册专业工程师。

目 录

译者序	本章习题	50
原书前言	参考文献	55
致谢	第3章 PSpice 高级功能	56
作者简介	3.1 元件模型	56
第1章 OrCAD PSpice Capture	3.1.1 电阻模型	58
基础知识	3.1.2 电容模型	59
1.1 简介	3.1.3 电感模型	59
1.2 PSpice 原理图绘制	3.1.4 二极管模型	62
1.2.1 启动 OrCAD Capture	3.1.5 晶体管模型	64
1.2.2 OrCAD 原理图绘制	3.1.6 场效应晶体管模型	66
1.3 直流分析	3.2 库文件的使用	68
1.3.1 静态工作点计算	3.3 元件参数值设置	
1.3.2 直流扫描分析	(.PARAM、.STEP)	70
1.4 屏幕图形显示 (PROBE)	3.3.1 .PARAM 语句	70
1.5 瞬态分析	3.3.2 .STEP 通用参数扫描	
1.6 交流分析	分析	72
本章习题	3.4 函数定义 (.FUNC、.INC)	75
参考文献	3.4.1 .FUNC 语句	75
第2章 PSpice 基本功能	3.4.2 .INC 语句	77
2.1 简介	3.5 子电路 (.SUBCKT、.ENDS)	77
2.1.1 元件描述语句	3.6 模拟行为模型	80
2.1.2 分析设置语句	3.6.1 VALUE 功能	81
2.2 直流分析	3.6.2 TABLE 功能	83
2.3 瞬态分析	3.6.3 FREQ 功能	85
2.3.1 瞬态分析信号源	3.6.4 LAPLACE 功能	87
2.4 交流分析	3.7 蒙特卡洛分析 (.MS)	89
2.5 打印和绘图	3.7.1 蒙特卡洛分析中的	
2.6 转移函数命令	元件容差设置	90
2.7 直流灵敏度分析	3.7.2 电路仿真	91
2.8 温度分析	3.8 灵敏度和最坏情况分析	
2.9 屏幕图形显示	(.WCASE)	93

3.9 傅里叶分析 (. FOUR)	100	poly、polyval 和 fzero)	161
3.9.1 通过 PROBE 进行 傅里叶分析	102	5.7.1 多项式的根 (roots、 poly、polyval)	161
3.9.2 有效值和谐波失真	103	5.7.2 求零点函数 (fzero) 与求 非零元素函数 (find)	162
本章习题	106	5.7.3 传递函数的频率响应 (freqs)	163
参考文献	112	5.8 保存、加载和文本读取函数	165
第4章 MATLAB®基础知识	114	5.8.1 保存和加载命令	166
4.1 MATLAB®基本运算	114	5.8.2 读文件函数	168
4.2 矩阵运算	116	5.9 Spice 与 MATLAB® 接口技术	171
4.3 数组运算	118	本章习题	173
4.4 复数运算	120	参考文献	178
4.5 冒号	122	第6章 二极管电路	179
4.6 for 循环	123	6.1 二极管	179
4.7 if 语句	125	6.2 整流	184
4.8 图形函数	129	6.3 二极管整流电路仿真	191
4.8.1 x-y 坐标图与标注	130	6.4 齐纳二极管电压调整电路	193
4.8.2 对数与 Plot3 函数	132	6.5 峰值检测电路	199
4.8.3 子窗口与屏幕控制	134	6.6 二极管限幅器	204
4.8.4 柱状图	136	本章习题	207
4.8.5 直方图	137	参考文献	211
4.8.6 火柴杆图	137	第7章 运算放大器	213
4.9 输入/输出命令	139	7.1 反相和同相放大器	213
本章习题	142	7.1.1 反相放大器	213
参考文献	146	7.1.2 同相放大器	217
第5章 MATLAB®函数	147	7.2 摆率和全功率带宽	220
5.1 M 文件	147	7.3 利用 Capture 对运算放大器电路 进行仿真	225
5.1.1 脚本文件	147	7.4 有源滤波器电路	226
5.1.2 函数文件	147	7.4.1 低通滤波器	226
5.2 数学函数	149	7.4.2 高通滤波器	230
5.3 数据分析函数	151	7.4.3 带通滤波器	233
5.4 微分函数 (diff)	154	7.4.4 带阻滤波器	241
5.5 积分函数 (quad、quad8、 trapz)	156	本章习题	244
5.6 曲线拟合 (polyfit、 polyval)	159	参考文献	248
5.7 多项式函数 (roots、			

第 8 章 晶体管特性及**电路设计 250****8.1 双极型晶体管特性 250****8.2 MOSFET 特性 254****8.2.1 截止区 254****8.2.2 放大区 (可变电阻区) ... 254****8.2.3 饱和区 255****8.3 BJT 偏置电路 257****8.3.1 温度效应 260****8.4 MOSFET 偏置电路 263****8.5 晶体管放大电路的频率响应 ... 267****8.6 晶体管电路的绘制与仿真 274****8.7 反馈放大电路 276****本章习题 282****参考文献 286**

第 1 章

OrCAD PSpice Capture 基础知识

1.1 简介

Spice (Simulated Program with Integrated Circuit Emphasis) 是电子行业标准电路仿真软件之一。它可以对电路进行交流分析、直流分析、傅里叶分析和蒙特卡洛分析。在电子工业发展的几十年中, Spice 语言一直被认为是模拟电路仿真领域的行业标准。近几年由 Spice 不断衍生出多种仿真软件, 主要包括 OrCAD、PSpice、HSpice 及 Intusoft IS - Spice 等。

与经典 Spice 仿真软件相比, PSpice 又增加了一些附加功能, 主要包括:

- (1) PSpice 具有后处理程序 PROBE, 可用于仿真结果的交互式图形显示。
- (2) 在未使用电流传感器与无源器件串联的情况下, 可以轻易地对电感、电容和电阻的电流进行测量。
- (3) PSpice 具有模拟行为模型, 可以通过数学公式、表格或传递函数建立模拟电路的功能模型。
- (4) PSpice 语言不区分字符的大写和小写, 但是在 Spice 源文件中所有字符必须大写。(例如 rab 和 RAB 在 PSpice 中是等效的。)

1.2 PSpice 原理图绘制

1.2.1 启动 OrCAD Capture

本书所讨论的 PSpice 仿真程序运行在 Windows 操作系统下。书中例子和说明全部基于 PSpice OrCAD 9.2 家庭精简版, 该软件由 Cadence 公司研制。如果 OrCAD PSpice 已经安装在您的计算机上, 则可以通过单击计算机的“开始”图标启动程序, 移动光标到“所有程序”, 然后单击“OrCAD 9.2 家庭版”程序, 最后选择“OrCAD Capture”运行程序。

按照如下步骤利用 PSpice 绘制电路并进行仿真分析：①建立电路；②对电路进行仿真；③打印或绘制结果。创建仿真电路时，首先从 Capture 菜单中选择“File/New/Project”，如图 1.1 所示。在项目对话框中选择“Analog or Mixed A/D”，然后输入项目名称和地址，该仿真项目的所有文件都将存储在该文件夹下。OrCAD 以“.opj”为文件扩展名。在“New Project”对话框中选择“OK”，然后在“Create PSpice Project”对话框中选择“Create a blank project”完成仿真工程的创建，具体步骤如流程 1.1 所示。

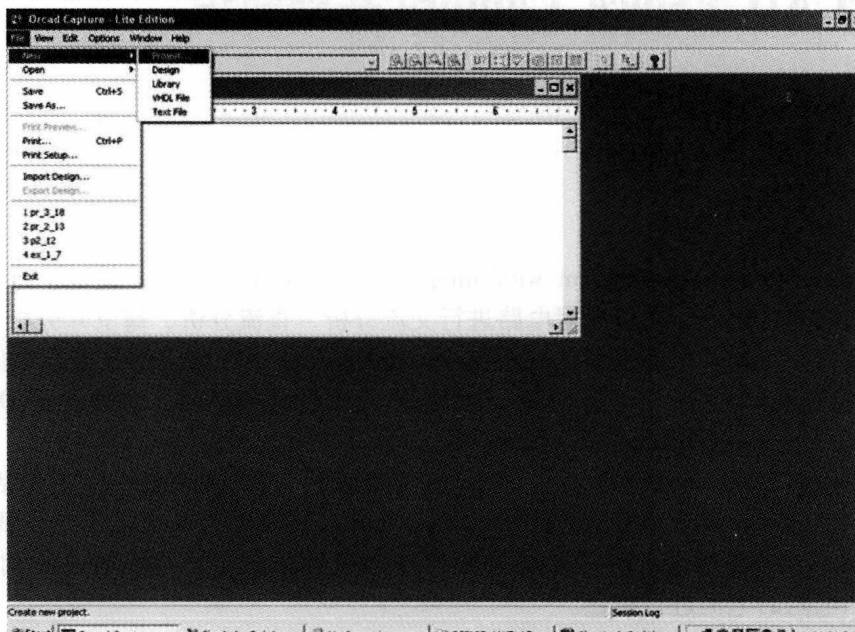


图 1.1 OrCAD Capture 启动界面

流程 1.1 创建 OrCAD 原理图的具体步骤

- 打开所有程序列表。
- 选择 OrCAD 9.2 家庭版。
- 单击 Capture Lite Editor。
- 打开 File/New/Project。
- 选择 Analog or Mixed A/D。
- 输入项目文件名称和地址。
- 单击 OK。
- 在“Create PSpice Project”（新项目）对话框中选择“Create a blank project”。

1.2.2 OrCAD 原理图绘制

原理图绘制主要包括三部分：①将电子元件放置在软件工作区；②调节电子元件参数；③通过导线把电子元件连接成电路。接下来通过实例演示 OrCAD 原理图的具体绘制过程。

实例 1.1 简单无源电路图绘制

以图 1.2 为例绘制仿真原理图，目的在于获得各节点电压。具体步骤如下：

(1) 将电子元件放置在软件工作区。

从 OrCAD Capture 菜单中选择“Place/Part”，从“Place Part”对话框中单击“Add Library”。OrCAD Capture 主要包括以下元件库：analog.olb，break-out.olb，source.olb 和 special.olb。选择“analog.olb”库，并且单击“Open”按钮，把元件库加载到当前项目文件中。可以通过同样的方法把“source.olb”加载到项目文件中。

以放置电阻为例，首先从库列表中选择“ANALOG”库，然后从“Part List”中选择 R，单击“OK”按钮“Place Part”将会关闭，通过单击左键把电阻放置在合适位置。表 1.1 列出了一些电子元件及其所属库。

Spice 必须为每个电路设置参考接地点。参考地可以从 OrCAD Capture 菜单中通过“Place/Ground”获得。

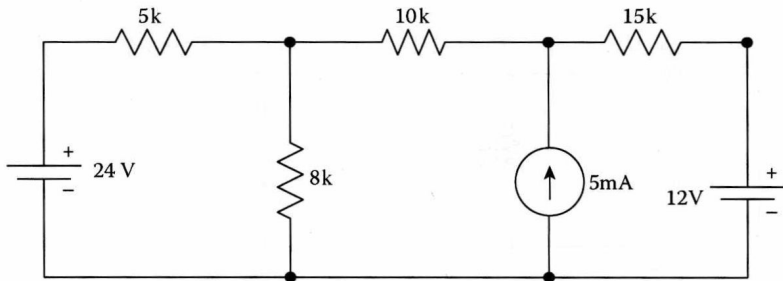


图 1.2 有源和无源元件构成的电子电路

表 1.1 PSpice 元件及其所属库

元件名称	PSpice 名称	PSpice 库
电阻	R	ANALOG
电容	C	ANALOG
电感	L	ANALOG
直流电压源	VDC	SOURCE
直流电流源	IDC	SOURCE

(2) 调节电子元件参数。

所有电子元件都具有默认值。首先单击左键选择元件，然后单击鼠标右键执行特定功能，如编辑属性、垂直镜像和水平镜像等。可以通过使用字母后缀或者比例系数调整电子元件参数值。

表 1.2 列出了 Spice 程序比例系数及其缩写。可以通过单击左键选定元件，再单击鼠标右键对其进行旋转。图 1.3 中元件 R2 和 I_1 即为旋转所得。

表 1.2 Spice 仿真程序比例系数缩写

字母后缀	全称	比例因子
T	Tera	10^{12}
G	Giga	10^9
Meg	Mega	10^6
K	Kilo	10^3
M	Milli	10^{-3}
U	Micro	10^{-6}
N	Nano	10^{-9}
P	Pico	10^{-12}
F	Femto	10^{-15}
Mil	Millimeter	25.4×10^{-6}

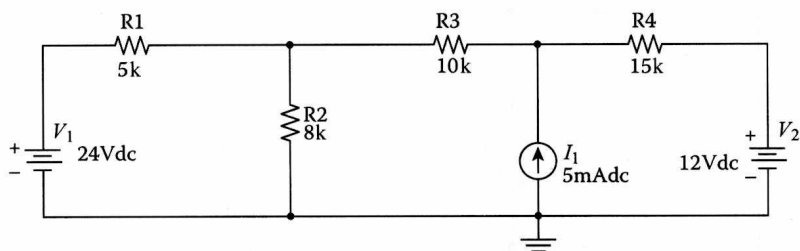


图 1.3 利用 OrCAD Capture 绘制图 1.2 的电路图

(3) 连接电路。

选择“Parts/Wire”对电路进行连接。在元件端点上单击鼠标左键然后移动鼠标到需要连接的端点，再次单击左键连接完成。流程 1.2 列出了利用 PSpice 绘制原理图的详细步骤。

■ 流程 1.2 OrCAD SCHEMATIC 绘制原理图详细步骤

- 从 OrCAD Capture 菜单中选择 “Place/Part”。
- 单击 “Add Library”。
- 选择 “analog.olb” 库，并且单击 “Open” 按钮。
- 选择库 “source.olb”，然后单击 “Open” 按钮。
- 单击 “Open” 按钮。
- 从特定的库中选择指定元件。
- 从模拟库中选择元件（例如 R、C、L）。
- 从电源库中选择电源元件（例如 V、I）。
- 单击 “OK” 按钮，关闭 “Place/Part” 对话框。
- 旋转元件：单击左键对元件进行选择，然后单击右键进行旋转。
- 调节元件参数值：鼠标右键单击该值，左键单击属性菜单，右键单击要更改的参数值或左键双击改变该值。
- 连接电路：选择 “Parts/Wire” 对电路进行连接。在元件端点上单击鼠标左键然后移动鼠标到需要连接的端点，再次单击左键连接完成。
- 单击右键，弹出 “End Wire” 菜单，单击 “End Wire” 完成电路连接。
- 双击 “GND” 将会弹出 “Property Editor” 菜单，将 “NAME” 栏中 “GND” 更改为 0，其他保留。

(4) 仿真电路。

从 OrCAD Capture 中选择 “PSpice/New Simulation Profile” 进行仿真。首先弹出 “Simulation Setting” 对话框，在 “New Simulation” 对话框中输入仿真文件名，然后选择 “create” 按钮，接下来选择 “Bias Point” 对电路进行分析，并且在 options 选项中选择 “General Settings” 常规设置，最后选择 “PSpice /Run” 对电路进行仿真分析。

(5) 显示仿真结果。

仿真结果可以通过文本文件或者屏幕图形显示进行读取。通过单击软件左侧竖直工具栏的第三个按钮对输出文本文件进行检查。在 PSpice A/D 中，仿真结果可以通过 “View/Output File” 直接显示在屏幕上，或者退出 PSpice A/D，返回原理图，单击第二排工具栏上的 “V” 符号，可以直接显示各节点电压，以使用户使用。仿真电路及其结果如图 1.4 所示。