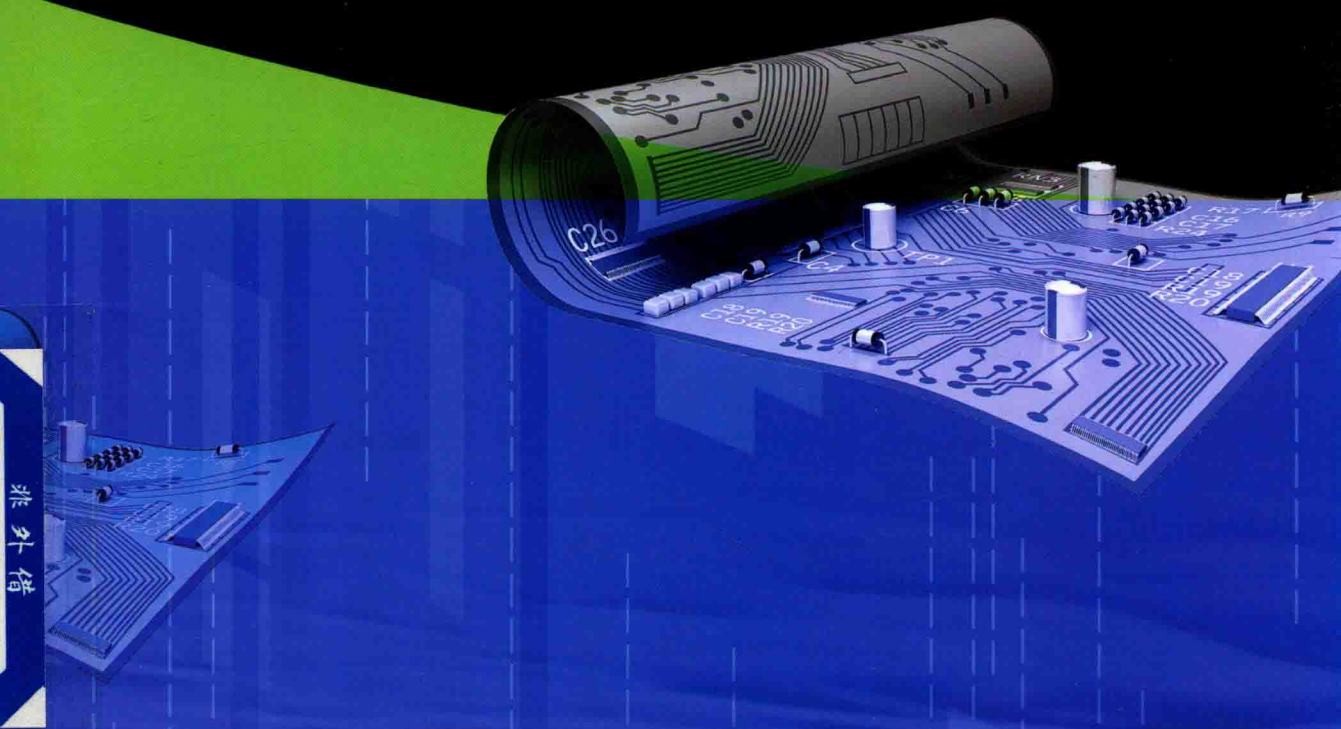
EDA应用技术

基于SPICE、SPECTRE与Fast-SPICE的电路及显示面板快速仿真原理

雷东　罗晶　编著



非外借

中国工信出版集团
電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

EDA 应用技术

基于 SPICE、SPECTRE 与 Fast-SPICE 的电路及显示面板快速仿真原理

雷 东 罗 晶 编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书详细阐述了以 SPICE 为代表的电路仿真器的发展过程，以及仿真原理和技术。全书共 6 章。第 1 章阐述了电路仿真器 SPICE 的发展历程，及其在电路和面板仿真领域的应用情况。第 2 章分析并阐述了 SPICE 在进行电路仿真过程中所要经历的流程，以及需要建立并求解的方程组，包括针对电路连接特性所建立的方程组，以及用于描述器件电学特性的模型方程组。第 3 章主要阐述了 SPICE 在进行电路的直流、交流或瞬态分析的时候，所采用的数值计算方法。第 4 章主要阐述了 SPICE 仿真的收敛性、精度和速度。第 5 章专门针对目前电路仿真领域发展比较快的 Fast-SPICE 的快速仿真原理进行了较为深入的介绍。第 6 章对目前常用的 SPICE 及 SPECTRE 电路仿真的语法进行了较为详细的说明。

本书适合显示面板设计及电路设计的相关从业人员阅读，也可以作为微电子相关专业的学生或研究人员的学习参考书。

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

基于 SPICE、SPECTRE 与 Fast-SPICE 的电路及显示面板快速仿真原理 / 雷东，罗晶编著. —北京：电子工业出版社，2017.9

（EDA 应用技术）

ISBN 978-7-121-32577-9

Ⅰ. ①基… Ⅱ. ①雷… ②罗… Ⅲ. ①印刷电路—计算机仿真 Ⅳ. ①TN410.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 210583 号

责任编辑：刘海艳
印　　刷：三河市鑫金马印装有限公司
装　　订：三河市鑫金马印装有限公司
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：10.75　字数：275 千字
版　　次：2017 年 9 月第 1 版
印　　次：2017 年 9 月第 1 次印刷
印　　数：2 000 册　　定价：49.00 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）88254888，88258888。

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

本书咨询联系方式：lhy@phei.com.cn。

前言 Introduction

半导体制造领域的成本投入是十分可观的。不论是制造设备的成本，还是原材料的成本，或是人力成本的投入，都是巨大的。因此，对利润的把控，就不能仅仅局限在最终的产品质量上，而是应该关注产品制造的每一个环节。集成电路或显示面板的设计，通常会存在一些不确定因素，使得设计出来的产品和制造出来的产品之间，总是存在着或大或小的差异。这种差异，有时候可能是正面的，更多时候，制造出来的产品会相对设计时要求的性能变差，导致产品优良率下降。如果在这个时候才发现了问题并进行修正，会延长产品的生产周期，并会造成生产资源的极大浪费，最终导致生产成本增加。因此，在产品设计的阶段，就要尽可能地减少由于设计所引入的不确定因素。而这种“减少”，一方面需要相关的设计人员具有较好的专业训练；另一方面，需要有力的验证手段来验证设计结果，SPICE 仿真便是其中之一。

对于集成电路和显示面板的设计来说，在正式生产之前，把相关的电路及器件的电学特性，通过 SPICE 在计算机中进行仿真，可以根据仿真结果，验证所设计的电路功能或逻辑是否能够通过现有的产品实现。此外，通过仿真不同工艺条件下的器件特性，也可以在一定程度上反映工艺变化对产品功能的影响。然后，设计人员可以根据这些结果，逐步修正产品设计。笼统地讲，通过 SPICE 进行的器件和电路仿真，是将产品的设计结果在计算机中，以“虚拟”的方式仿真一遍，并根据仿真结果，验证电路或显示面板设计的合理性。对于大规模的集成电路，以往的仿真是针对某些电路单元的逻辑和功能进行的。对于显示面板，同样也只是对驱动电路中的某些单元，或者像素电路中的某几行进行仿真。之所以在 SPICE 中，只对某些电路单元进行仿真，是因为目前的 SPICE 的仿真能力还不足以实现对整个电路，或者全显示面板的快速仿真。因此，Fast-SPICE 技术应运而生。

本书由雷东、罗晶编著。合肥京东方显示技术有限公司的廖燕平先生审阅了本书的全稿，并提出了很多宝贵的意见。借此机会，作者一并向北京大学信息工程学院的张盛东教授、林信南副教授，以及香港科技大学的陈文新教授说一声谢谢。感谢他们在平时的工作中和我们进行的讨论。Cadence 电子科技有限公司的陈伟先生也为本书的出版提出了很多宝贵的意见。此外，深圳市视显光电技术有限公司对本书的出版给予了很大的支持。在此一并表示感谢！

由于作者水平有限，书中若有不妥之处，还请各位同行多多批评指正。

编著者

2017 年 7 月

目录 Contents

第 1 章 SPICE 的发展及其在显示面板设计中的应用 …… 1

1.1 SPICE 的发展 …… 1

1.2 SPICE 在显示面板设计中的应用 …… 3

参考文献 …… 7

第 2 章 电路的 SPICE 仿真流程与方程的建立 …… 8

2.1 电路的 SPICE 仿真流程 …… 8

2.2 节点分析法 …… 10

2.2.1 线性电阻 …… 11

2.2.2 电容 …… 11

2.2.3 电感 …… 12

2.2.4 独立的电流源 …… 12

2.3 改进的节点分析法 …… 15

2.3.1 独立电压源 …… 16

2.3.2 压控电压源（VCVS） …… 17

2.3.3 压控电流源（VCCS） …… 18

2.3.4 流控电压源（CCVS） …… 19

2.3.5 流控电流源（CCCS） …… 19

2.4 器件模型与模型方程 …… 20

2.4.1 线性电阻 …… 21

2.4.2 电容 …… 22

2.4.3 电感 …… 23

2.4.4 独立电流源 …… 24

2.4.5 独立电压源 …… 25

2.4.6 压控电流源 …… 25

2.4.7 二极管 …… 26

2.4.8 场效应晶体管（MOSFET） …… 32

2.4.9 薄膜晶体管（TFT）的 SPICE 模型 …… 38

参考文献 …… 39

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第 3 章　电路的 SPICE 分析 ····· 41
3.1　直流（DC）分析 ····· 41
3.1.1　线性电路的直流分析 ····· 42
3.1.2　非线性电路的直流分析 ····· 44
3.2　交流（AC）分析 ····· 51
3.3　瞬态（Tran）分析 ····· 52
3.3.1　欧拉法 ····· 52
3.3.2　欧拉法的截断误差 ····· 54
3.3.3　欧拉法的稳定性 ····· 55
3.3.4　梯形法及其稳定性 ····· 56
3.3.5　Gear 法及其稳定性 ····· 58
3.3.6　对储能元件的分析 ····· 59
参考文献 ····· 60
第 4 章　SPICE 仿真的收敛性、精度、速度与 Fast-SPICE ····· 61
4.1　SPICE 仿真的收敛性 ····· 61
4.1.1　直流仿真的收敛性 ····· 62
4.1.2　交流仿真的收敛性 ····· 70
4.1.3　瞬态仿真的收敛性 ····· 70
4.2　SPICE 仿真的精度 ····· 73
4.2.1　直流仿真的精度 ····· 73
4.2.2　交流仿真的精度 ····· 75
4.2.3　瞬态仿真的精度 ····· 75
4.3　SPICE 仿真的速度与 Fast-SPICE ····· 80
4.3.1　稀疏矩阵技术 ····· 80
4.3.2　器件模型的处理 ····· 82
4.3.3　计算方法 ····· 84
4.3.4　快速仿真器 Fast-SPICE ····· 86
参考文献 ····· 88
第 5 章　Fast-SPICE 仿真原理 ····· 89
5.1　电路分割（Circuit Partition） ····· 89
5.1.1　电路分割的原则 ····· 89
5.1.2　对功率网络的划分 ····· 90
5.1.3　对晶体管栅极连接点的划分 ····· 92
5.1.4　对理想电压源的划分 ····· 92
5.2　Fast-SPICE 中电路的层次仿真（Hierarchical Simulation） ····· 94
5.2.1　层次仿真的基本概念 ····· 94
5.2.2　层次仿真中的节点 ····· 98

5.2.3　层次仿真中电路的存储方式 …… 98
5.2.4　等效阻抗分割法 …… 99
5.2.5　基于分割电路的层次仿真 …… 103
5.3　寄生 RC 网络的压缩 …… 118
参考文献 …… 122
第 6 章　SPICE 及 SPECTRE 电路仿真的语法 …… 123
6.1　SPICE 及 SPECTRE 电路仿真网表的结构 …… 123
6.2　控制语句 …… 127
6.2.1　电路初始条件控制 …… 128
6.2.2　选项设置（OPTIONS） …… 128
6.3　器件（元件）及器件模型的 SPICE 语法 …… 129
6.3.1　电源 …… 129
6.3.2　器件 …… 140
6.3.3　器件模型 …… 150
6.4　参数与表达式 …… 153
6.5　宏模型与子电路 …… 154
6.6　电路分析的 SPICE 语法 …… 156
6.7　仿真结果输出的 SPICE 语法 …… 158
参考文献 …… 162

第1章 SPICE的发展及其在显示面板设计中的应用

1.1 SPICE的发展

绝大部分的理工科学生，在本科阶段都学习过电工电子技术及相关的课程。那个时候，我们需要花很多时间，通过笔和纸去分析各种各样的电路。所采用的基本原理通常是叠加原理、基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律。但是，很明显，我们在教科书里分析的电路，通常是规模比较小的简单电路。对这些电路的分析，通常用笔和纸就可以完成。

有些时候，在经费允许的情况下，也会去搭建一些电路板，用来分析某些特定的电路。

随着电路规模的不断增大，上面两种方法都受到了限制。

1969—1970年，从某大型半导体公司到UC Berkeley任教的Ronald A. Rohrer先生（见图1-1），给当时电子系的研究生授课，他留给这些学生的任务之一，就是写一个计算机程序，用于较大规模的电路分析，并作为这几名研究生的毕业考核。时任系主任的Donald O. Pederson先生（见图1-2）同意了这个建议。最后作为代表向老师汇报这一结果的是Laurence W. Nagel先生（见图1-3）。他们给这套程序取名为Computer Analysis of Nonlinear Circuits，Excluding Radiation，简称为CANCER[1]。

图1-1 Ronald A. Rohrer先生

图1-2 Donald O. Pederson先生

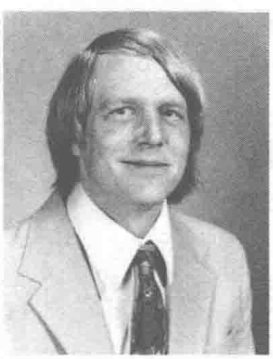


图1-3 Laurence W. Nagel先生

之后，Laurence W. Nagel先生在Donald O. Pederson先生的指导下，在博士论文中，进一步完善了这套程序，并将其改名为Simulation Program with Integrated Circuit

Emphasis，简称 SPICE[2]。一开始，SPICE 是采用 FORTRAN 语言编写的。它把类似于直流分析、交流分析、瞬态分析、噪声分析、灵敏度分析等一系列电路分析方法通过一套程序实现，并且，把常用半导体器件的模型[3, 4]内嵌于其中。通过这些模型的计算，来尽可能真实地反映器件的电学特性。这极大地方便了电路的仿真流程。此外，学校里面的学生大量使用这套程序，一方面，会在使用过程中提出很多有效的意见，这对于进一步增强 SPICE 的鲁棒性有很大的帮助；另一方面，这些学生毕业后，会把这些程序和使用习惯带到工作岗位上去，这对于 SPICE 的普及具有巨大的推动作用。此外，这套程序是开源的。因此，到 20 世纪 70 年代末，SPICE 已经在半导体公司得到了大量的推广，并成为了集成电路公司用于电路仿真的标准软件。

SPICE 的第二版 SPICE2 在 1975 年发布。依然是采用 FORTRAN 语言编写的。它一方面继承了 SPICE 的全部优点；另一方面，在数据结构的存储，以及仿真收敛性方面有了很大的改进。从这段时间开始，就有很多大型的商业用户，在 SPICE2 的基础上，开发出一些新的版本，例如，贝尔实验室开发的 ADVICE、德州仪器公司开发的 TISPICE 和摩托罗拉公司开发的 MCSPICE 等。

后来，由于 FORTRAN 语言的维护相对比较困难，SPICE 从第三版 SPICE3 开始，采用 C 语言编写。这一版在 1989 年发布。这个从 FORTRAN 语言到 C 语言的转变工作，最早是由 Thomas Linwood Quarles 做的。可是，通常在关于 SPICE 发展的这段历史的描述中，很少有人会主动提起这个名字。感兴趣的读者也许可以从 Andrei Vladimirescu 的书[5]中，以及 Thomas Linwood Quarles 本人的博士论文[6]中，窥探到其中的一点点原因。更多的情况下，在提到这段历史的时候，是不会主动提及这个名字的。

在 SPICE 的 C 语言版本问世之后，很多人在这套程序的基础上，开发出了很多商业化的 SPICE。最为成功的，要数 Shawn Hailey 和 Kim Hailey 兄弟开发的 SPICE 了。因为他们的姓 Hailey 的首字母为 H，所以他们就把这个 SPICE 取名为 HSPICE。据说，这是一对孪生兄弟。他们俩当时在另外一家大型的半导体公司工作。他们很敏锐地“嗅”到了当时的 C 语言版本的 SPICE 存在的一些问题。于是，他们在美国加州注册了一家公司，名为 Meta Software。决定开发相应的商用 SPICE。HSPICE 在 1996 年被 AVANTI 公司收购，在 2001 年被如今的 EDA 巨头之一的 SYNOPSYS 收购，并发展成为当今微电子领域的标准仿真器之一。此外，在 EDA 领域，还有一些较为流行的商用 SPICE，如 Smart-SPICE、P-SPICE、AIM-SPICE、SPECTRE 和 ELDO 等。

在 SPICE 的发展过程中，还有一些人像前面我们提到过的那些人一样，有过不少的贡献，如 Bob Berry、Shi-Ping Fan、Frank Jenkins、Jesse Pipkin、Steve Ratner 和 Lynn Weber。

综上所述，SPICE 本质上就是一套电路仿真的计算机程序。它可以利用计算机，更加快速、高效地去分析较大规模的电路。SPICE 在进行电路分析时所采用的原理，依然是基尔霍夫定律。

在采用 SPICE 进行电路仿真时，用户需要将电路的拓扑结构用 SPICE 的网表语言描述出来。而电路中的每个器件的物理特性，也需要以计算机能够识别的方式呈现在仿真过程中。半导体器件的物理特性在仿真时的这种呈现，就是器件的 SPICE 模型。

1.2　SPICE 在显示面板设计中的应用

图 1-4 是小尺寸显示面板的基本轮廓示意图。从图中可以看出，靠近显示面板中央的区域为有效显示区域（Active Area），通常简称为 A/A 区。A/A 区就是像素及像素电路存在的区域。画面在这里通过像素的亮度变化进行显示。在 A/A 区的左右两侧，是用来控制每一行像素 TFT 开关信号的电路。在早些时候，这一功能是通过特定的 IC 芯片实现的。随着显示面板制造工艺的不断进步，通过在玻璃基板上，制造一些特定的逻辑单元来实现对像素 TFT 开关的控制。这种类型的电路就是位于阵列基板上的栅极驱动电路（Gate driver on array），简称为 GOA 电路。GOA 电路中的每一个单元重复出现，实现相同的功能，即控制所在行的 TFT 的开启和关闭。因此，每一个 GOA 单元连接一行栅极扫描线。有时，GOA 电路会分布在 A/A 区的两侧，如果左侧一行的 GOA 电路中的每一个单元，分别连接像素的奇数行；那么，右侧一行的 GOA 电路中的每一个单元，就会分别连接像素的偶数行。也有的时候，会把 GOA 电路放在 A/A 区的一侧，另一侧留作他用。

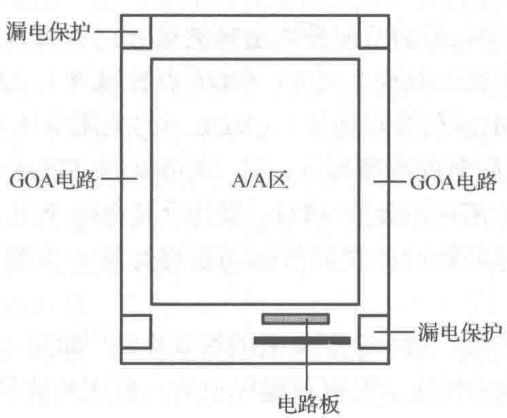


图 1-4　小尺寸显示面板的构造轮廓

在显示面板的四个拐角，通常设计了漏电保护单元。这是一个较为简单的电路单元，并与 GOA 电路相连接。

连接信号线的 IC 以及一些电路板，通常会放在显示面板的下部，这些外部结构，通过引线（Fanout），与 A/A 区的信号线相连接。外部的电视信号就是通过这个渠道，在 GOA 开启某一行的像素 TFT 之后，同时对这一行的像素进行充电的。这一行充电结束后，GOA 通过对信号电压的控制，关闭这一行的 TFT。然后再开启下面一行的像素 TFT，以同样的方式进行充电。

需要说明的是，不论是栅极驱动信号还是数据信号，在正式进入显示面板之前，是“混合”在一起的。在面板的下部，通常会有一个时序控制器（TCON），也叫屏驱动板。它的作用是将数字板接收过来的图像数据信号，包括数据信号、时钟信号、控制信号通过 TCON 处理之后，转换成可以驱动液晶显示屏的各种协议的输出信号。笼统地讲就是，TCON 把各种信号进行分离，并按一定的时序输入到显示屏中。通常，TCON 的同步输入信号包括时钟信号 CLK、行同步信号 HS、场同步信号 VS 和数据使能信号 DE。输出的信

号分为两部分，一部分给栅极驱动 IC，一部分给数据驱动 IC，如图 1-5 所示。

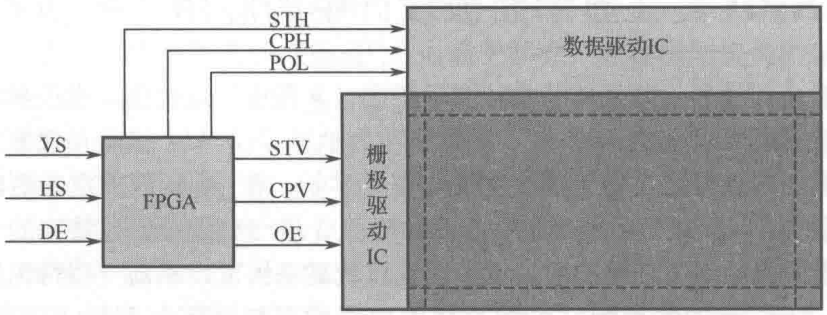


图 1-5　显示面板中，同步信号在进入驱动 IC 前的分离

图 1-5 中用 FPGA 替代 TCON 实现同步信号的分离。所谓 FPGA，是 Field-Programmable Gate Array 的缩写，是一种可编程的控制 IC。相对于专用芯片，采用 FPGA 可以根据实际需要来定制显示控制功能，设计更具可靠性和灵活性，而且开发成本低、周期短，具有完全的知识产权。

可以看出，通过 TCON 或 FPGA 分离出来的信号，一部分给栅极驱动 IC，包括垂直方向控制信号 STV（垂直起始脉冲）、CPV（垂直移位脉冲）、OE（数据输出使能脉冲）。同时来自电源芯片的 VGH（门开启电压）、VGL（门关闭电压）也会输入到栅极驱动 IC 中，它们一起实现对栅极信号的准确写入。从 TCON 或 FPGA 分离出来的信号的另一部分给数据驱动 IC，包括水平起始脉冲 STH、极性反转电压 POL、水平移位脉冲 CPH。感兴趣的读者可以查阅相关书籍对各类信号的功能进行进一步的了解。这里不做过多的阐述。

对于 AMLCD 显示面板，每一个亚像素的等效电路[7]如图 1-6 所示。TFT 的栅极连接扫描线，进而与 GOA 单元相连。源极和漏极中的一极连接信号线，另一极则与液晶电容（C_{lc}）及存储电容（C_{st}）相连。除此之外，在扫描线和 TFT 上，还寄生了大量的电阻和电容。这些寄生的电阻和电容形成寄生 RC 网络，在信号传输时，会首先对这些 RC 网络充放电，从而导致信号延迟。

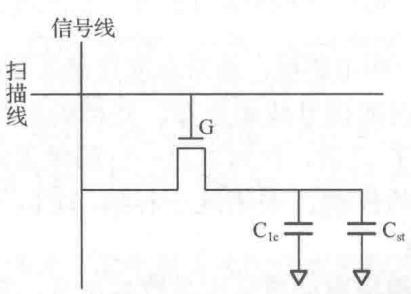


图 1-6　AMLCD 面板的亚像素等效电路

图 1-7 所示为显示面板的扫描线上的驱动信号。每一行的信号由相应的 GOA 单元给出。很明显，显示面板的扫描信号是一个脉冲信号。信号从扫描线的一端进入，直至传输到位于扫描线另一端的最后一个亚像素。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

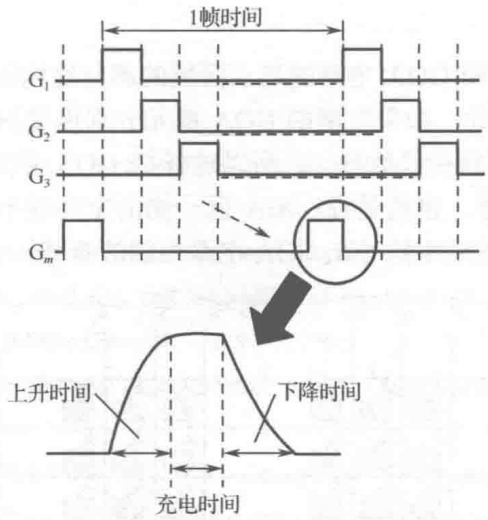


图 1-7　显示面板的扫描线上的驱动信号

随着信号传输距离的增加，信号的延迟也逐渐变大。同样如图 1-7 所示，假设输入信号是标准的脉冲方波信号。随着信号传输距离的增加，信号波形发生了变化。波形中的上升时间和下降时间，使得每一个像素 TFT 的开启时间减小，相应地每一个亚像素的充放电时间会减小。因此，在设计和制造的过程中，要尽可能地减少信号传输线和 TFT 上的寄生。但是，这种寄生通常是不可避免的。而且，在很大程度上会影响显示面板的显示效果。所以，在显示面板设计的过程中，要对这些寄生 RC 所引起的信号延迟效应，及其所导致的，对每一个亚像素的充放电的影响进行 SPICE 仿真，从而在设计阶段，就能明确这些寄生效应所引起的可能后果。

而对于 AMOLED 显示面板，其中的每一个亚像素都具有相对 AMLCD 更为复杂的结构。图 1-8 所示为具有两个 TFT 和一个电容（2T1C）的 AMOLED 的亚像素电路[8]。

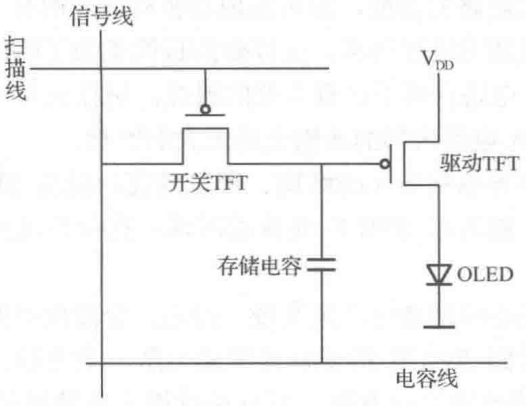


图 1-8　AMOLED 显示面板中的 2T1C 电路

这个电路结构相对比较简单。其中的两个 TFT，一个用作开关，一个用作驱动 OLED。然而实际的 AMOLED 显示面板中的像素电路，都要比这个电路复杂。很明显，这样的电路比图 1-6 中所示的电路具有更为复杂的结构与寄生效应。在 SPICE 进行仿真的时候，需要考虑更多的影响因素。也就是说，像素电路的结构越复杂，对 SPICE 仿真的

要求越高。

图 1-9 是包含 A/A 区和 GOA 电路的显示面板的部分结构示意图。图中的 GOA 电路分布在 A/A 区的两侧。因此，如果左侧的 GOA 单元分别连接扫描线的奇数行，则右侧的 GOA 单元就分别连接扫描线的偶数行。之所以这样把 GOA 单元分列在 A/A 区的两侧，很大一部分原因是空间不够。也就是说，A/A 区一侧的空间放不下全部的 GOA 电路。还有一个很重要的原因，就是减小信号在 GOA 电路内部的衰减。

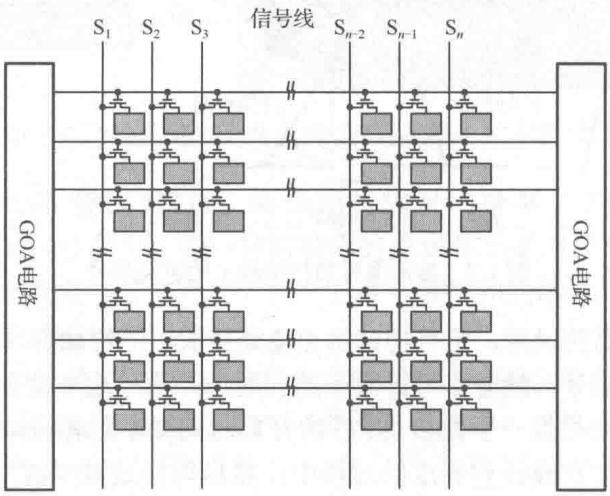


图 1-9　包含有面板 A/A 区和 GOA 电路的部分结构的示意图

在整个 GOA 电路内部，是一些重复出现的 GOA 单元电路。这些 GOA 单元之间相互连接。信号通常是从一个 GOA 单元进入，通过移位寄存器，逐次传递到下一个 GOA 单元，然后通过 GOA 单元传递到每一行扫描线上。

因此，在显示面板设计的过程中，首先要对 GOA 单元电路进行 SPICE 仿真。仿真的目的在于明确 GOA 单元电路的功能，能否实现对驱动信号的有效传输。其次，要对信号在 GOA 电路内部的传输情况进行仿真。这样做的目的是为了明确信号在 GOA 电路内部的衰减情况。因为 GOA 电路内部不仅有大量的器件，而且也有大量的寄生 RC 网络。这些结构都会对信号在 GOA 电路内部的传输造成很大的影响。

在明确了显示面板中各电路单元的结构、寄生情况，以及 SPICE 仿真的结果后，更进一步的想法或目的是，能否在 SPICE 仿真的时候，把所有这些因素同时考虑进去，即实现所谓的全面板仿真。

全面板仿真面临的核心问题是仿真速度慢。因为，全面板中的器件及电路的规模具有一定的数量，这对于普通的 SPICE 的求解计算能力是一个考验。因此，解决全面板电路仿真的核心手段是算法的改进。一方面，可以通过增大计算机的内存，通过并行计算实现。另一方面，可以通过对电路结构的分割，以及对显示面板中的寄生 RC 网络的有效压缩，通过所谓的 Fast-SPICE[9]，实现对全面板电路的仿真。这一技术目前还处于发展阶段，相关的产品还有很大的发展空间。在本书的第 5 章会对 Fast-SPICE 仿真的技术性问题进一步地进行阐述。

参考文献

[1] L. W. Nagel. Computer Analysis of Nonlinear Circuits, Excluding Radiation (CANCER). IEEE Journal of Solid-State Circuits, August, 1971.

[2] L. W. Nagel. Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis. Ph.D. Dissertation, UC Berkeley, 1975.

[3] H. Shichman, D. A. Hodges. Modeling and simulation of insulated-gate field-effect transistor switching circuits. IEEE Journal of Solid-State Circuits , Vol. SC-3, 1968.

[4] H. K. Gummel, H. C. Poon. An integral charge control model of bipolar transistors. Bell Syst. Tech. J. May, 1970, 49 (5): 827–852.

[5] Andrei Vladimirescu. The SPICE Book. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994.

[6] T. L. Quarles. SPICE3, Analysis of Performance and Convergence issue for Circuit Simulation. Ph.D. Dissertation, UC Berkeley, 1989.

[7] 戴亚翔. TFT-LCD 面板的驱动与设计. 北京：清华大学出版社，2008.

[8] 陈金鑫，黄孝文. OLED 梦幻显示器——材料与器件. 北京：人民邮电出版社，2011.

[9] P. Li, L. M. Silveira, P. Feldmann. Simulation and Verification of Electronic and Biological Systems. Springer, Netherlands, 2011.

第2章 电路的 SPICE 仿真流程与方程的建立

从本章开始，将深入分析 SPICE 在进行电路仿真时，底层的原理和算法，也就是 SPICE 是如何实现电路仿真的。第 2 章阐述 SPICE 在进行电路仿真时的总体流程和被仿真电路的方程的建立。第 3 章到第 5 章重点阐述电路的直流（DC）分析、交流（AC）分析和瞬态（TRAN）分析的具体算法、收敛性，以及如何实现电路的快速仿真。本章只针对所用到的 SPICE 网表中的一些语法有针对性地做一些说明，关于 SPICE 的语法详细阐述见第 6 章。

2.1 电路的 SPICE 仿真流程

从一个简单的电路开始分析。图 2-1 所示的是一个包含三个电阻（R_1、R_2、R_3）和一个恒流源（I_1）的简单电路。电路中包含 n_1、n_2 和 0 三个节点。n_1 节点处的电压标记为 V_1，n_2 节点处的电压标记为 V_2。0 节点表示该点接地。在通常使用 SPICE 对这一电路进行仿真时，用户直接面对的是如下的电路网表：

R_1	n_1	n_2	2
R_2	0	n_2	5
R_3	0	n_2	5
I_1	0	n_1	5

其中，第一行表示电阻 R_1，连接在节点 n_1 和 n_2 之间，电阻值为 2Ω。其他两个电阻的表述方式类似。第四行则表示恒流源 I_1 连接在节点 0 和 n_1 之间，电流为 5A。

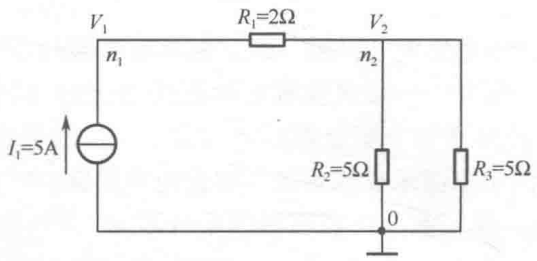


图 2-1 包含一个独立电流源的电阻电路

在进行 SPICE 仿真时，首先需要用户通过 SPICE 的网表文件描述电路的拓扑结构。SPICE 通过对网表的解析，获得这个电路的拓扑结构之后，会对电路中的电流-电压关系列方程。通常采用的方法就是基尔霍夫电流定律（Kirchhoff Current Law，KCL）和基尔霍夫电压定律（Kirchhoff Voltage Law，KVL）。KCL 定律可以简单地表述为，对于电路中的某一个节点，流入该节点的电流与流出该节点的电流的代数和为零，即

$$\sum_{k=1}^{n} i_k = 0 \tag{2.1}$$

式中，k 表示与该节点相连接的支路个数。流入和流出该节点的电流的符号相反。

KVL 定律可以表述为，某一闭合回路中的所有元件两端的电压的代数和为零，即

$$\sum_{k=1}^{n} V_k = 0 \tag{2.2}$$

其中，k 表示闭合回路中元件的个数。

因为基尔霍夫定律需要计算电流和电压的代数和，因此，在运用这两个定律之前，SPICE 需要先规定电流和电压的方向。如图 2-2 所示，规定高电压到低电压的方向，电压为正。电流从高电压流向低电压为正；反之，则为负。

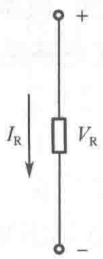


图 2-2　电流和电压方向的约定

在确定了上面的约定之后，采用 KCL 列出图 2-1 所示电路的方程。

$$\text{节点 } n_1\text{：}\ -I_1 + \frac{V_1 - V_2}{R_1} = 0$$

$$\text{节点 } n_2\text{：}\ \frac{V_1 - V_2}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_2}{R_3} = 0 \tag{2.3}$$

对上面的方程组稍加整理，可以得到

$$\text{节点 } n_1\text{：}\ \frac{V_1}{R_1} - \frac{V_2}{R_1} = I_1$$

$$\text{节点 } n_2\text{：}\ -\frac{V_1}{R_1} + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right) V_2 = 0 \tag{2.4}$$

以矩阵和向量的形式在计算机中实现方程组的求解相对比较方便，因此，在 SPICE 的程序中，需要把式（2.4）中的方程组表示为如下的矩阵形式。

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{R_1} & -\frac{1}{R_1} \\ -\frac{1}{R_1} & \frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{2.5}$$

通常，因为电路中的元件的电导，在计算时可以直接相加，所以，在 SPICE 中，需要把式（2.5）中的关系用电导进行表示。

$$\begin{pmatrix} G_1 & -G_1 \\ -G_1 & G_1+G_2+G_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{2.6}$$

综上所述，SPICE 在对类似图 2-1 所示的电路进行仿真时，首先根据基尔霍夫定律列出电路的电流和电压关系方程。因为图 2-1 所示的电路为线性电路，所以得到的电压-电流关系也为线性关系。但是，对于含有非线性元件的非线性电路，SPICE 在分析求解电路时，得到的也是电压和电流的线性关系，即类似式（2.6）所示的关系。因此，对于每一个非线性元件，在将其模型嵌入 SPICE 中时，需要对这些非线性的元件进行线性等效。对于显示面板设计中常用的非线性半导体元件及其在 SPICE 中的线性等效电路，将在后面的章节中给出，并会结合具体的电路分析方法详细阐述。

此外，在得到式（2.6）所示的电压-电流关系前，根据由基尔霍夫定律得到的方程组进行了一系列的推导。这些推导在 SPICE 程序中的实现，是需要耗费一定的运算时间的。因此，有一种方法可以直接根据描述电路结构的网表，得到与式（2.6）类似的电压-电流关系。

2.2 节点分析法

本节给出节点分析法的具体流程。此外，还给出在采用节点分析法进行分析时，所涉及的一些线性元件的导纳矩阵。这些元件包括线性电阻、电容、电感和独立的电流源。对电路中出现的电压源，采用节点分析法进行电路分析时，需要进行一些改进。因此，在 2.3 节中，会针对电压源进一步阐述改进的节点分析法。

这里，将式（2.6）中的关系概括为

$$\boldsymbol{YV} = \boldsymbol{I} \tag{2.7}$$

式中，$\boldsymbol{Y}$ 表示电路元件的导纳矩阵；$\boldsymbol{V}$ 表示电压列向量；$\boldsymbol{I}$ 表示电流列向量。式（2.7）很明显地表示出了电压（$\boldsymbol{V}$）和电流（$\boldsymbol{I}$）之间的线性关系。而节点分析法[1]则是根据电路网表，直接给出 $\boldsymbol{Y}$ 矩阵的具体形式。这需要在 SPICE 的源程序中，事先将电路分析中可能会用到的电子元件所满足的式（2.7）中的关系，以模板的形式事先嵌入其中。很明显，$\boldsymbol{Y}$ 矩阵就是一个 $N\times N$ 的矩阵。其中的 N 为半导体元件的端点数。例如电阻，电容和电感的 $\boldsymbol{Y}$ 矩阵为 2×2 矩阵，二极管的 $\boldsymbol{Y}$ 矩阵也为 2×2 矩阵，TFT 的 $\boldsymbol{Y}$ 矩阵为 3×3 矩阵，等等。

这里需要说明的是，式（2.7）的一般形式可以表示为

$$\boldsymbol{YV} - \boldsymbol{I} = 0 \tag{2.8}$$

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com