前 言

在设计电路时,SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) 是必需工具。特别是在设计开关电源时,如果用手工制作的电路板,则很难评价 开关电源的动作的稳定程度。之所以这样说,是因为最近将开关用的晶体管内置 的单片开关电源IC中,开关频率正在向MHz高频化。

线圈和电容器的尺寸变小,电源部分实现了小型化,而另一方面,电路板也 必须实现小型化,不然就无法充分发挥电源的性能。这是因为,在试制阶段,为 了确认电源本来的性能,必须缩短布线长度,也不留下插入电流检测仪的空间, 另外,设置测量用的引线不能发挥原本电源的性能。在这种情况下,如果要推算 线圈的峰值电流大小,就要用到LTspice。

LTspice对开关电源进行仿真最接近实际动作的结果,是高性能、高速度的 仿真器。很多IC厂家都公布了各种IC的SPICE模型,但是却几乎没有哪个厂家公 布过关于开关电源IC的SPICE模型。适用于LTspice的模型只有凌特公司(LTC公 司)生产的电源用IC,可以这么认为,使用LTC公司生产的电源IC就能实现现在 所需要的大部分电源的要求规格。

若是电源之外的IC或者分立器件(如晶体管、FET、运算放大器、逻辑IC 等),用其他公司的产品也能进行仿真。当然,应该在本书所示的"LTspice允许 和免责"范围内使用。不过,使用从网络等地方下载到的SPICE模型进行电路设 计,能在实用范围内进行仿真,且能进行与实际电路几乎相同的评价,也是非常 美的事情。此种情况也能实现高速仿真。

然而,如果要进行复杂一点的仿真,那么日语的参考文献几乎没有。当然, LTspice为英文版,有很好的Help功能,还有超过200多页的PDF版的使用指南 (英语版)可供下载。反观日语的资料,虽然已经出版了一些入门书籍,但是都 局限在一些简单用法的范围内。另外,虽然笔者至今为止共在几十次LTspice研 讨会中对一些较便利的使用方法进行过解说,但是要想熟练运用,却比想象中更 深奥。于是,优先选择一些在电路评价中频繁用到的几项用法进行各种尝试,并 对此前积累的解说材料进行总结。

对于太深奥的用法,本文将不会涉及。另外,在本书第2部分,列举了一些

学习电子电路的基础例题,灵活运用LTspice对这些例题进行了解说。同时,为 了更有效地运用LTspice,本书也介绍了一些相关知识。

执笔此书之际,因想访问LTspice的作者Michael Engelhard先生(简称Mike), 特请凌特公司(日本法人)的相关人士为我安排会面。在各位的鼎力相助与支持 之下,2009年4月,于Linear Technology Corporation(美国加利福尼亚州)得以和 Mike先生面谈。而且,2010年11月再次得以和Mike先生相见,度过了一段很有



LTspice作者和笔者近照

意义的时间。

当时,Mike先生就如何熟练使用LTspice方面的要点给予了指教,在这些要点的基础上,感悟到LTspice各种功能的奥妙,得以充实本书的内容。

在此对Mike以及给予了大力支持的各位表示 深深的谢意。

右侧的照片是与Mike面谈后拍的纪念照 片(2010年11月),彼此约定今后要致力于推动 LTspice的发展和普及。

> 2011年7月 涉谷道雄

LTspice 作者写的前言(摘自英语 PDF 版"前言")

1. LTspice之外的SPICE还有必要吗?

模拟IC设计离不开模拟电路仿真。SPICE仿真是在把电路组装进芯片之前唯一的检验方法。而且SPICE仿真还可以测量电压、电流,用其他的方法实际上是无法做到这些的。这些模拟电路仿真的成功还扩展到了电路板相关的电路设计。不管在什么情况下,仿真要比制作电路试验板更简单。另外,电路仿真还可以对电路的性能和问题点进行检验,能更快地推进电路实际组装。

市面上已有好几种SPICE仿真器,现在还要写关于新的仿真器的书吗?

这是因为,市面上已有的SPICE仿真器有时很难对某种模拟功能进行仿真。 开关电源中高频方波的开关整体上与缓慢的环响应共存。这就意味着,要研究开 关电源整体的响应情况,仿真器就必须进行数千次乃至数十万次的仿真。市面上 的SPICE只面向实用性的仿真,只会延长仿真时间。开关电源进行仿真时,与要 花好几个小时的仿真器相比,还是几分钟之内就能执行的仿真器更有用。

也有一些仿真器提供了对开关电源的模拟仿真进行高速化的仿真方法,但是 这些仿真器不是把复杂的开关波形简单化,就是将控制逻辑的功能无效化,都要 付出一定的代价。而这种组合了进行开关式控制的基本逻辑的新SPICE能给予更 好的结果。它的仿真速度快,能输出波形的具体情况,并且还保持了既有仿真器 能灵活处理电路变更的优点。

LTspice IV是针对开关电源系统的电路板模型而新开发出来的SPICE。新 SPICE里嵌入了模型化的板级电路器件。不需使用子电路(即内部节点)就能把 电容器和线圈的串联电阻和寄生电容等特性模型化。另外,用于功率MOSFET仿 真的电路要素、通常的栅极电荷状态的正确表示部分,也不需使用子电路即内部 节点进行模型化。如此一来,节点数的减少使得不用在开关波形的具体情况(即 正确性)方面妥协就能进行仿真,还能急剧减少计算量。它的优点是:不管在哪 个频率,即使是有有限阻抗的电路板的器件模型,只要使用用于这种仿真的新器 件,就能轻易地避免模拟收敛的问题。

最近的开关电源中(SMPS: Switch Mode Power Supply)含有用于复合动作 模式的控制逻辑。比如,由于电路动作,器件(IC)从脉冲开关调制变为突发模 iv LTspice 作者写的前言(摘自英语 PDF 版"前言")

式或周波跳跃。LTspice IV中配有新编写的模型混合模式编译器和仿真器,这些 产品不但能够实现高速计算,而且模型化和原型一模一样。

尽管SMPS和LTspice之间有着很密切的关系,但是SPICE绝不是仅仅局限于 SPMS,也不是像简单的对话形式那样使用的仿真程序。

现在有约1500种凌特公司的产品被用于LTspice的模型化。这种程序就是高性能的通用SPICE仿真器,可以在凌特公司的网站上下载到。其中的模型电路文件可以按步骤观测到阶跃负荷响应、启动、瞬态响应等。另外,这种SPICE还配备用于画电路图的装备齐全的全新的电路图输入程序。

2. LTspice的历史背景

SPICE是一种能在PC上进行电路仿真的程序,还能观察到电路中的电压和电流波形是怎样的。SPICE能对电压值和电流值进行相对于时间的计算(即瞬态分析: Transient Analysis)和相对于频率的计算(交流分析: AC Analysis)。另外SPICE还可以进行直流分析、灵敏度分析、噪声分析和失真分析等。

SPICE是由Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis的首字母组成的缩写,意思是"侧重于集成电路(IC)的仿真程序"。它是一种20世纪70年代中期由美国加利福尼亚大学的伯克利分校研究室开发的程序。随着IC需求的增加,在实施昂贵的IC制造工程之前,利用这个程序对电路设计进行细节的调整和评价,以推进开发的进程。



图0.1 LTspice的历史

SPICE仿真器和应用程序已经扩展到模拟电路、数字电路、微波器件和电子 设备系统。如今,SPICE还增加了电路图输入连接和用图表显示计算结果等功能, 有几个不同的供应商。LTspice继承加州大学伯克利分校开发的SPICE,于1999 年由凌特公司(总部在美国加利福尼亚州苗必达市,下称LTC公司)为了实现 开关电源的高精度仿真特别开发、并经过程序最优化。2008年11月公布的Ver. IV进一步改良了用于仿真渐进式计算的解算器,能够对应最新的CPU。

3. 从LTspice Ver.III到Ver.IV的主要改良点

(1)多线程处理。最近采用了多核CPU的PC开始大量上市。例如采用了Intel 公司的Core 2 Duo、Core 2 Quad、Core i7的PC,用合适的价格就可以买到手。使 用这样的多核CPU,就要对LTspice程序进行改良,使它能进行多线程处理。

不过,同时执行多个仿真时,虽说是多线程处理也不一定速度就快。这不是 LTspice的问题,而是OS多任务管理的问题。

(2)分析程序的改良。在Ver. IV中的进一步改良中,最重要的改良是配备 了被称为"SPARS"的行列式计算解算器。因此,电路分析时必需的联立方程 式的收敛(渐进式)计算变快了。由于这样的改良,对于大规模电路使用Core 2 Quad,速度就可以快3~4倍,不过对于小规模电路可能就感受不到仿真执行时 间的差。

4. 关于模板文件

本书提到的例题中的模板文件可以在OHM社网站主页下载。用 → 标示的 电路图,只要利用模板文件就可以执行仿真。文件扩展名为"*.asc"的文件是电 路图文件,文件扩展名为"*.plt"的是表示仿真结果的设定文件。把两个文件放 入同一个文件夹并执行仿真,就会显示本书所示的波形图。

5. 模板文件的下载方法

- (1) 打开OHM社主页"http://www.ohmsha.co.jp/"。
- (2)在"書籍検索"栏中检索"回路シミュレータLTspiceで学ぶ電子回路"。
- (3) 打开本书的主页,点击下载按钮。
- (4) 解压下载文件。

目 录



第1部分 LTspice的基础

第1章	LTspice初体验———————	3
1.1	下载及程序更新	
1.2	快速启动指南······	14
第2章	电路图的输入————————————————————————————————————	51
2.1	编辑基本的电路图	
2.2	配置新的元件	
2.3	电路要素······	
2.4	层次化(Hierarchy)	
第3章	适 仿真命令与SPICE指令—————	147
3.1	解析用的点命令	147
3.2	SPICE命令	
3.3	注释(Comment)	
3.4	使用频率高的点命令	
3.5	子电路相关的点命令	
3.6	其他的点命令	
第4章		179
4.1	波形显示窗口······	
4.2	数据跟踪的选择······	
4.3	波形的运算	
4.4	用户定义函数······	
4.5	数轴的控制	
4.6	快速存储文件格式(Fast Access File Format)	



命令	读取图形和运算的	4.7
207	控制面板	第5章
207	控制面板概要	5.1
	各面板的设置	5.2

第2部分 LTspice的应用

第6章	简单的电路实例————————————————————	221
6.1	R、C、L的V-I特性	221
6.2	C、L的交流特性	226
6.3	有源元件的V-I特性	236
6.4	晶体管交流放大器	239
6.5	CMOS逻辑电路····································	245
第7章	开关电源拓扑结构	249
7.1	降压转换器	249
7.2	Boost(升压)转换器······	257
7.3	反激式转换器	
7.4	SEPIC 转换器	271
7.5	Cuk转换器······	275
7.6	Buck-Boost(升降压)转换器	277
7.7	正向转换器	279
第8章	使用了运算放大器的电路	281
8.1	什么是运算放大器	281
8.2	运算放大器的AC解析例题······	286



第9章 参考电	已路—————	295
9.1 Educationa	l文件夹里的电路······	
9.2 逻辑仿真试	验	
9.3 其他的应用	电路	
第10章 SPICE	模型的使用	313
10.1 文本驱动	形式表记法	
10.2 把SPICE相	奠型导入电路图(A)	
10.3 把SPICE相	奠型导入电路图(B)	
10.4 把SPICE	Model导入电路图(C)	
10.5 分立部件	幸的编辑	
第11章 其他條	言息	329
11.1 开关电源i	设计要点	
11.2 开关电源的	的评价要点	
11.3 SMPS的频	页率响应解析(FRA)	
11.4 根据命令排	是示符进行批处理	
11.5 错误信息		
11.6 LTspice中	可用的函数	
11.7 利用旧版:	文件	
附录———		367
附录A 相关网站	占和参考图书	
附录B 用户组(Users' Group)	
译后记———		371



第1章LTspice初体验

无论什么计算机应用软件,即使没有对那个软件全盘了解也能使用它。一般都是先从 会用的地方开始尝试,在使用的过程中渐渐掌握更方便的功能。

LTspice也同样,通过基本的使用方法,慢慢学习能应用到所期望用途的操作方法, 这样应用范围也会变得广泛。本章旨在学习LTspice的基本操作方法。

1.1 下载及程序更新

1.1.1 软件的下载及安装

LTspice的最新版本可在凌特公司(LTC公司)的网站(http://www.linear-tech.cpcjp/)中通过点击"设计支持"来下载。

	製品 回路集 デザインサポー	English 中☆同 ト 購入 会社概要	18 品質 採用 問い合わせ MyLinear サーチ アドバンスサーチ →
デザインサポート	Home > デザインサポート		
 >デザインサポート > LT Journal of Analog Innovation > クロスリファレンス情報 > ソフトウェア > ソリューション小冊子 	デザインサポート リニアテクノロジー(はシミュレーション・ツ	ール、信頼性情報、バッケージ情報など、全	製品の完全なサポートを提供しています。
>バッケージング情報	デザイン・シミュレーション	品質と信頼性	バッケージ情報
 ・) パリノン・リーボート > 品質保証と信頼性 > 技術的質問 > 鉛(Pb) フリーブログラム 	LTspice IV. BodeCAD. Quick-Eval System、FilterCADおよびSpice Modelsのダウンロードは <u>テザイン・シミ</u> <u>コレーションのページ</u> をご利用願いま ず。	信頼首生データ、組立、検査に関する情報。ISO認証など詳細は品質と信頼首生 例、ISO認証など詳細は品質と信頼首生 のページをご利用願います。	バッケージ寸法、バッケージ互換表、熱 抵抗およびトップマーキングなど詳細 は、バッケージ情報のページをご利用願 います。

图1.1 日语的下载网站

在日语的网站中,下载地址如下,有两个选择(图1.2)。 http://www.linear-tech.cp.jp/designtools/software/ltspice.jsp

一个是提供给登录用户的,另一个是提供给未登录用户使用的下载地址。 登录之后可以收到新产品信息的推送。未登录并不影响所下载LTspice的功能。 同日语网址一样,此软件也可在英文下载网址(http://www.linear.com/)中 下载。



图1.2 LTspice的下载

双击文件便可开始安装(如果杀毒软件出现警告提示,在确认提示的情况下,点击"是"、"继续"或者"允许"继续安装)。安装完成之后,每个月会收到一次后述的"Sync Release"推送的软件更新提示。

双击下载后的文件便会开始自动安装。安装之后会在桌面上创建LTspice的 图标(图1.3)。



图1.3 LTspice IV图标

安装到预设的文件夹之后,文件夹的结构如下。

C盘(主驱动)

L Program Files

____LTC <新安装的话会自动生成文件夹>

SwCADIII 如果之前安装了ver.3版本的话,会残留此文件夹(新安装的LTspice不生成)
 LTspiceIV 这里有LTspiceIV的执行文件 "scade.exe"(考虑到作为其他应用的驱动的情况,执行文件名没有改变)
 examples 存有各种例题、参考电路
 Educational 存有最适合模拟电路学习的电路例子

_____FRA 保存有LTspice进行频率响应解析的资料

—— PAsystem 象征实际的零件形状的功率放大器电路图



-Contrib.

- lib 这里存着分立元件的程序库

1.1.2 程序的启动

双击桌面的快捷图标,可启动LTspice。通过这个可以实现仿真基本操作。 但是Windows OS是在Vista之后的版本,在进行下述的"程序及数据的更新"和 数据库的编辑时,必须通过管理者权限来启动。Windows XP之前的版本则无需 考虑这个问题。

要通过管理者权限启动,必须先右击桌面上的LTspice图标,单击出现的菜 单下的"属性"。接着会出现图1.4左侧所示的窗口,点击"兼容性"的标签,勾 选"特权级别"范围中的"作为管理者运行此程序",然后单击OK。

从桌面上的图标使用可以看出,根据使用的OS版本不同,需通过管理者权限启动的情况下会出现盾牌图标(图1.4右侧)。如果杀毒软件出现警告提示,在确认提示的情况下,点击"是"、"继续"或者"允许"继续安装。



图1.4 作为管理者运行的设置



1.1.3 程序及数据的更新

LTC公司开发完新产品后,就会在LTspice中追加宏模型。此外,还对电路图 输入的操作方法、仿真实验结果的表示方法等进行易用性的改良和对功能的追 加。每次更新宏模型和程序时,版本代码也随之更新。

程序及数据的更新通过鼠标操作LTspice的菜单栏进行,这个操作指令称为 "Sync Release(同步发布)"。在刚启动的状态下(在还没有出现电路图窗格的情况下)单击"Tools"菜单的"ync Release"(图1.5)。

出现图1.5右侧的信息之后单击 "OK",便开始更新。若出现下述"注意事项" 中提到的信息窗口,点击"是"或者"OK",关闭不需要的窗口之后再运行。



图1.5 Sync Release (同步发布)



在使用杀毒软件的情况下,会出现确认启动更新的请求,若不点击"确认"的话,Sync Release将无法运行。开始下载数秒之后,会出现表示下载进度的窗口,由此可知下载及更新正在进行。所需时间与网络速度及PC的性能有关。根据笔者的经验,网速为40Mbps、Intel Core 2 Duo的3GHz的CPU的PC情况下,大概需要2分钟。

Sync Release完成之后,没有需要更新的东西时会弹出图1.8左侧的提示。另外,更新完成之后,会出现提醒更新完成的提示窗口。这个窗口有两种,较小的(图1.8中间)是不随版本代码变化而变化的,较大的(图1.8右侧)是随版本代码变化的。

要确认版本代码,可点击"Help"菜单的"About LTspiceIV",会显示版本 代码及变更日期(图1.9)。

LTspice IV	LTspice IV	LTspice IV
Nothing to update!	The update was completed successfully	The LTspice IV executable has been successfully updated OK
ОК	ОК	

图1.8 Sync Release结束的信息



图1.9 LTspice IV的版本

更新是不定期的,多的时候两天之内更新五次,也有的时候连续两周以上没 有一点变化。虽说一个月不运行Sync Release也不会有什么太大的问题,但还是 建议尽量使用最新的程序及数据进行仿真操作。所以,最少也要一个月进行一次 Sync Release。

更新历史会记录在LTspice IV文件夹的Changelog.txt中。一般情况下,文件会和Sync Release同时更新,若没有更新的话,再次安装并"覆盖"文件即可。通过"覆盖",可以直接进行颜色设置及利用自己追加的数据库中的模型。

1.1.4 关于官方指南

LTspice的下载及安装没有附加在指南里。单击"Help"菜单中的"Help Topics"(图1.10左侧)或者按 **F1** 打开Help.Help界面的"目录"标签,选择 "FAQs",单击"What about a Paper Manual?"项,就能链接到PDF文件(图1.10 右侧),单击即可获得英文指南(约200页)。



图1.10 官方指南

链接地址: http: //LTspice.linear.com/software/scad3.pdf → PDF-Manual ENG\scad3.pdf 收录英文指南

最新的PDF版指南会在文章中修改新追加的按钮,但控制面板的图中没有修改。本书着重说明新增加的功能,旨在方便初学者的学习。

本书的编著参照了英文版PDF及帮助文件。上述的PDF版指南会定期更新, 本书采用的是2010年2月19日在网络上发布的版本,但是用户界面等的图像是与 2011年6月21日的LTspice Ver.4.11x的界面相符合的。

此外,帮助文件也会定时修正,但PDF版之后(2011年7月)没有进行修改。 据作者Mike所说:"使用LTspice的环境下利用帮助文件是很方便的",而且"Unix 系统的OS无法读取Windows版的帮助文件,所以准备了PDF文件"。

1.1.5 LTspice IV 的特点

1. 允许直流浮动节点

一部分的SPICE仿真器对于直流浮动节点,通过高电阻与GND连接,必须在

仿真节点的直流电压之前设法决定电路。但是,LTspice即使遇到这样的直流浮动 节点,也能够进行仿真操作。无需添加电路元件也能进行仿真操作,是LTspice 的一大优点。



图1.11 直流浮动节点

图1.12表示的是仿真直流浮动节点存在状态的结果。由图可知,10kHz的正 弦波电压源(振幅 = ±1V)分到C1和C2(容量均为1nF)的中点(图中节点 数字为2)的电压刚好是原来的二分之一。这样就可以确认,尽管图中的2号节 点变为直流浮动,仿真操作也可以准确无误地进行。



图1.12 直流浮动节点的仿真操作

2. 可应对多线程

2008年11月,随着LTspiceIII更新到LTspiceIV版本,多线程的并列计算成为可能。它能够自动识别Intel的多核CPU,最大限度发挥PC的功能,并且能够时常更新,使其能够对应最新的CPU。控制面板的"SPICE"标签显示了当前用户所使用的CPU最多能有多少线程(参照图1.13及第5章)。

17 0	Control Panel		x
	Operation I Hacks! I Internet Compression Save Defaults Default Interration Method Trapezoidal @ modified trap @ Gear Default DC solve strategy Noopiter Skip Gmin Stepping Engine Solver[*]: Alternate Max threads: 4 Matrix Compiler: object code	Hetlist Options SPICE TD Gmin: Abstol: Reltol: Chetol: Trtol[*]: Volttol: Sstol: MinDeltaGmin: Accept 9K4 as No R	Waveforms tartine Options 1e-012 0.001 1e-014 1 1e-006 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001
可利用的最大线程	從 [*] Setting remembered between Reset to Default OK	program invocations Values	一帮助

图1.13 CPU的线程数的确认

为了慎重起见,需补充说明:使用LTspice的多线程处理是为了在一个测试 (仿真操作)中进行并列计算,多重任务的速度并不会加快。虽然多个LTspice能 够同时启动,但是同时运行时各个仿真操作的所需时间并不会缩短。这是由于多 重任务的任务进程管理是OS的问题,并不是应用软件的LTspice的问题。所以仿 真操作还是逐个进行比较好。

1.1.6 本书的相关表述规则(包含习惯用法)

1. LTspice

表示是由凌特(LTC)公司所制作的SPICE。注意,表述的时候,LT要采用 大写形式,spice则用小写形式。但在指示一般的SPICE时,则用大写形式SPICE。

2. 在SPICE中使用的文字

经商定,LTspice中使用的文字(半角数字)不区分大小写。初期阶段的 SPICE使用编程语言FORTRAN来表示,后来演变成使用大写字母表示。然而如 今,从编程语言而来的指令大多使用小写字母。现在的LTspice之外的SPICE系统 也一般不区分大小写字母。

3. 本书使用的电路符号

本书所用的电路图中,使用图1.14(a)的符号来表示电阻。JIS提倡使用图 1.14(b)的表述方法,但LTspice所采用的例题电路图使用的是图1.14(a)的表 述方法。过去日本国内出版的多数关于电路的书籍中采用了类似图1.14(a)(起 伏数不同)的表述方法,这也是本书采用此表述方法的理由。其他的电路符号沿