

精益设计

Lean Design

〔日〕涉谷 道雄·著

彭 刚·译

活学活用LTspice电路设计

子电路相关的点命令

读取图形和运算命令

晶体管交流放大器

Cuk转换器

运算放大器的AC解析例题

逻辑仿真试验



科学出版社

精益设计

活学活用LTspice电路设计

〔日〕涉谷 道雄 著

彭刚



科学出版社

北京

图字：01-2011-6652号

内 容 简 介

本书主要介绍如何活用LTspice进行电路设计，内容包括：电路图的输入、仿真命令与SPICE指令、波形显示器、控制面板、简单的电路实例、开关电源拓扑结构、使用了运算放大器的电路、参考电路、SPICE模型的使用等。

本书具有较强的实用性，书中内容深入浅出，可以作为电源设计、信号处理、通信等相关专业领域的工程技术人员的参考书，也可供工科院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目（CIP）数据

活学活用LTspice电路设计 / (日) 涉谷道雄著; 彭刚译. —北京: 科学出版社, 2016.1

ISBN 978-7-03-046443-9

I. 活… II. ①涉…②彭… III. 电子电路—电路设计 IV. TN702

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第274489号

责任编辑: 杨 凯 / 责任制作: 魏 谨
责任印制: 赵 博 / 封面设计: 张鹏伟

北京东方科龙图文有限公司制作
<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

天津新科印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第 一 版 开本: 720×1000 1/16
2016年1月第一次印刷 印张: 24 1/4
印数: 1—3500 字数: 413 000

定价: 49.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

Original Japanese language edition

Kairo simulator LTspice de Manabu Denshi Kairo

By Michio Shibuya

Copyright © 2011 by Michio Shibuya

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2016

All rights reserved

回路シミュレータ LTspice で学ぶ電子回路

渋谷道雄 オーム社 2011

著者简介

渋谷道雄

1971年毕业于东海大学电子工程专业。在民间医疗机构的研究所任NMR等研究员。从1979年开始,在外资半导体厂家从事MOS产品的企划、开发、设计工作12年。之后,在日本半导体公司及外资IC厂家的技术部从事IC的设计开发工作。2007年5月,在半导体公司(株)三共社担任现场技术支持工程师,现在任职董事。

著作

《Excelで学ぶ信号解析と数値シミュレーション》(合著,オーム社)

《Excelで学ぶフーリエ変換》(合著,オーム社)

《マンガでわかるフーリエ解析》(オーム社)

《マンガでわかる半導体》(オーム社)

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。

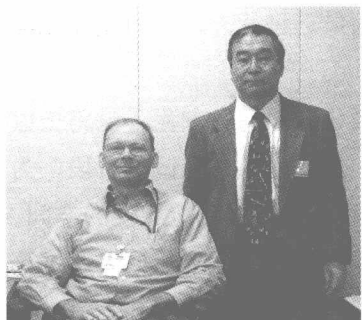
若是电源之外的IC或者分立器件（如晶体管、FET、运算放大器、逻辑IC等），用其他公司的产品也能进行仿真。当然，应该在本书所示的“LTspice允许和免责”范围内使用。不过，使用从网络等地方下载到的SPICE模型进行电路设计，能在实用范围内进行仿真，且能进行与实际电路几乎相同的评价，也是非常美的事情。此种情况也能实现高速仿真。

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，度过了一段很有意义的时间。



LTspice作者和笔者近照

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

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。

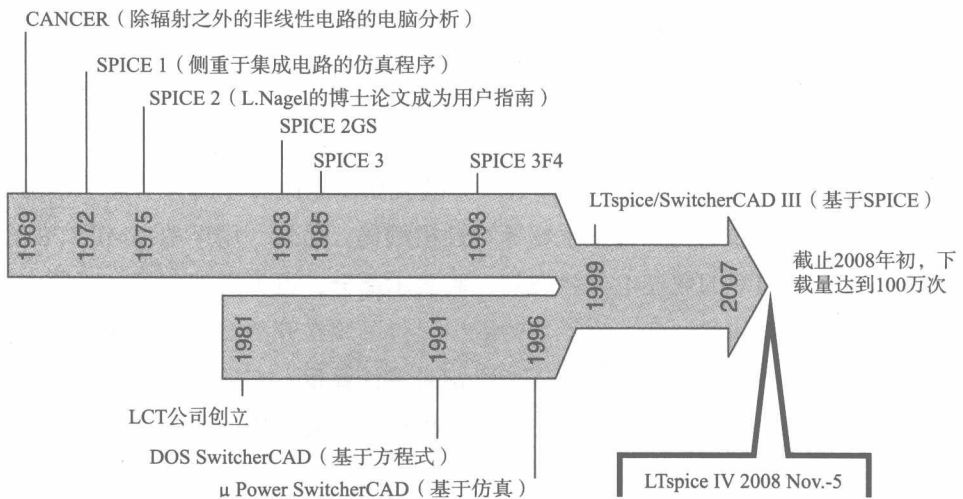


图0.1 LTspice的历史

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“书籍检索”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。

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	3
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	51
2.2	配置新的元件	51
2.3	电路要素	60
2.4	层次化 (Hierarchy)	136
第3章	仿真命令与SPICE指令	147
3.1	解析用的点命令	147
3.2	SPICE命令	160
3.3	注释 (Comment)	160
3.4	使用频率高的点命令	161
3.5	子电路相关的点命令	168
3.6	其他的点命令	168
第4章	波形显示器	179
4.1	波形显示窗口	179
4.2	数据跟踪的选择	180
4.3	波形的运算	182
4.4	用户定义函数	183
4.5	数轴的控制	185
4.6	快速存储文件格式 (Fast Access File Format)	195

4.7 读取图形和运算命令	197
第5章 控制面板	207
5.1 控制面板概要	207
5.2 各面板的设置	207
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	267
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 参考电路	295
9.1 Educational文件夹里的电路	295
9.2 逻辑仿真试验	303
9.3 其他的应用电路	308
第10章 SPICE模型的使用	313
10.1 文本驱动形式标记法	313
10.2 把SPICE模型导入电路图 (A)	317
10.3 把SPICE模型导入电路图 (B)	322
10.4 把SPICE Model导入电路图 (C)	324
10.5 分立部件库的编辑	327
第11章 其他信息	329
11.1 开关电源设计要点	329
11.2 开关电源的评价要点	335
11.3 SMPS的频率响应解析 (FRA)	340
11.4 根据命令提示符进行批处理	348
11.5 错误信息	356
11.6 LTspice中可用的函数	361
11.7 利用旧版文件	365
附录	367
附录A 相关网站和参考图书	367
附录B 用户组 (Users' Group)	368
译后记	371

A central dark grey rectangle contains the title text. It is surrounded by a circuit diagram. On the left, there is an AC voltage source labeled 'IN' with a plus sign at the top and a minus sign at the bottom, connected to a ground symbol. Below it, a resistor and a capacitor are connected to ground symbols. On the right, a circuit branch contains a capacitor and a diode connected to ground symbols. The background is a textured grey.

第1部分

LTspice的 基础

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.cpc.jp/>）中通过点击“设计支持”来下载。

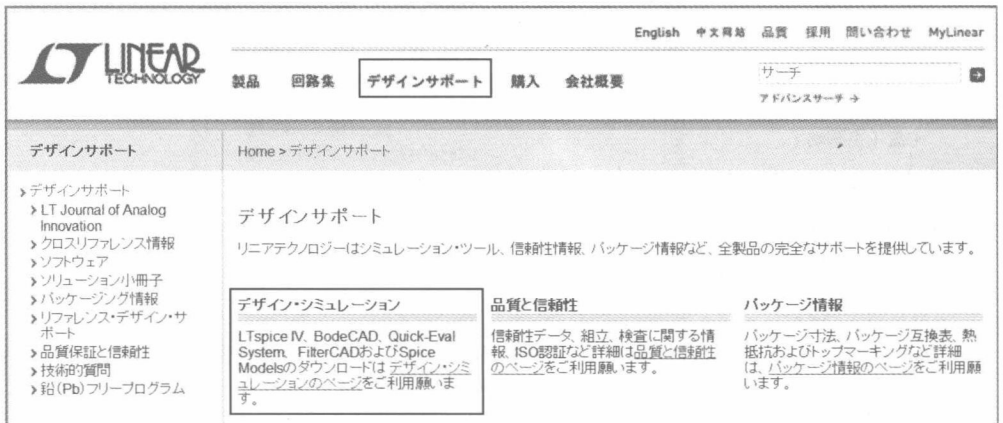


图1.1 日语的下载网站

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.cpc.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。

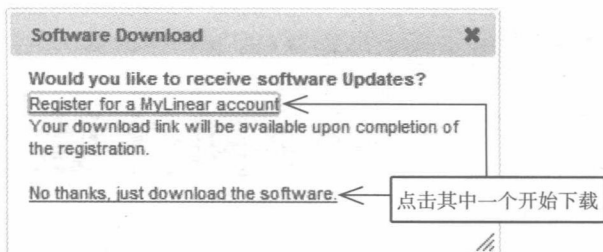


图1.2 LTspice的下载

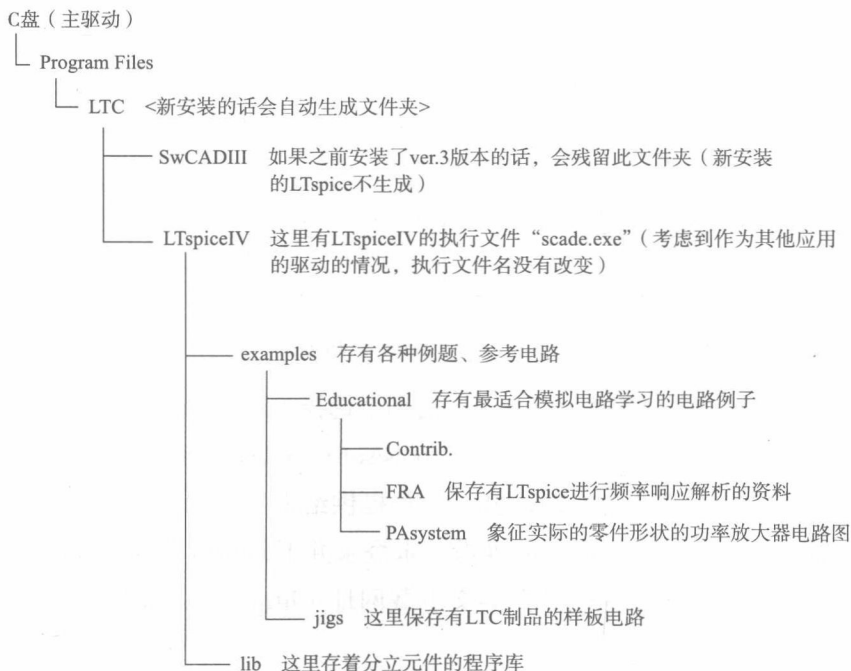
双击文件便可开始安装（如果杀毒软件出现警告提示，在确认提示的情况下，点击“是”、“继续”或者“允许”继续安装）。安装完成之后，每个月会收到一次后述的“Sync Release”推送的软件更新提示。

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。



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。

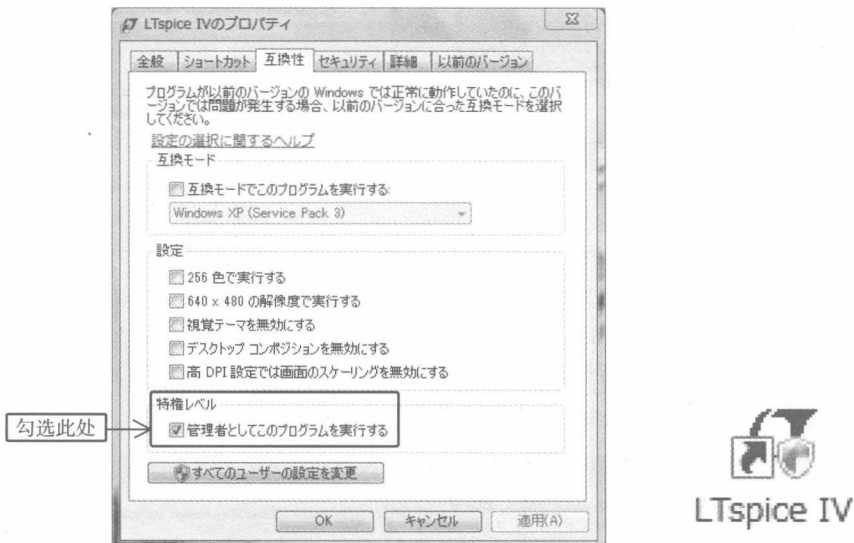


图1.4 作为管理者运行的设置

注意事项

杀毒软件等与安全性有关联的程序开启状态下，通过管理者权限启动LTspice的话，安全关联程序会弹出“无法启动”这样的错误信息。其中的原因没有详细调查，但大致可推测出是由启动中几个步骤的时间差引起的。

出现这个信息完全不会影响LTspice的运行，可以忽视。但是若将此信息窗口隐藏在LTspice的启动界面之下的话，会导致其他的测试启动变得十分缓慢，操作中还可能会出现错误。出现这种情况时最好点击右上角的“×”，将错误信息窗口关闭。