

01
1001
0101011001

电磁场与微波技术实验教程

DIANCICHANG YU WEIBO JISHU SHIYAN JIAOCHENG

王 琦 编 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

013028182

0441.4-33
02

电磁场与微波技术 实验教程

王琦 编著



北京邮电大学出版社
· 北京 ·



北航

C1637394

0441.4-33

02

内 容 简 介

本书的内容包括微波器件的设计与仿真实验以及硬件测试实验两部分。

第一章为微波器件的设计与仿真实验,实验内容包括阻抗匹配器、滤波器、功率分配器、定向耦合器、低噪声放大器、宽频带放大器。实验不仅有助于学生加深理解抽象的电磁场理论、传输线理论、微波电路设计等理论知识,而且培养学生的综合分析、开发创新和工程设计能力。

第二章是微波器件的测试实验,实验内容包括:波长和反射系数的测量、阻抗的测量、滤波器测试和定向耦合器测试。通过实验,学生应掌握有关电磁场与微波的基本测量方法和技能,学会利用频谱仪和矢量网络分析仪测量微波器件参数的方法。

本书适用于高等院校相关专业的本科生和研究生使用,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁场与微波技术实验教程/王琦编著.--北京:
北京邮电大学出版社,2013.3

ISBN 978-7-5635-3429-6

I. ①电… II. ①王… III. ①电磁场—实验—高等学
校—教材②微波技术—实验—高等学校——教材
IV. ①O441.4-33②TN015-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 047750 号

书 名: 电磁场与微波技术实验教程

作 者: 王琦

责任编辑: 满志文

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)

发 行 部: 电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京联兴华印刷厂

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 8.5

字 数: 145 千字

版 次: 2013 年 4 月第 1 版 2013 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-3429-6

定价: 23.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

随着卫星通信、移动通信、个人通信、光通信的飞速发展,移动电话的迅速普及,蓝牙、无线 LAN、GPS 等无线数据通信设备的快速开发,电磁场和微波技术越来越受到人们的关注,培养具有电磁场和微波技术理论知识和实践能力的人材也成为学校和社会共同的迫切需要。

电磁场理论与微波技术课程是通信工程、电子信息工程及电子科学技术类专业学生的重要的专业基础课程,该类课程具有抽象的理论知识和较强的工程实践性。实验教学的目的是帮助学生加深对抽象理论知识的理解,培养学生利用“场”的观点分析解决实际问题的能力,提高学生的科研能力及工程实践素质。目前电磁场理论与微波技术的实验内容大体分为计算机仿真和硬件测试两方面。借助于微波仿真软件进行设计性的实验不仅有助于学生加深理解抽象的电磁场理论、传输线理论、微波电路设计等理论知识,而且培养学生的综合分析、开发创新和工程设计能力。

本书的第一章是微波器件的设计与仿真实验。实验内容涉及的是通信中常用的无源、有源微波器件,实验的难度循序渐进。从基础的阻抗匹配开始,到低通滤波器、带通滤波器,功率分配器、定向耦合器,最后是有源器件低噪声放大器和宽频带放大器。具体的实验安排如下:实验一为 L 型匹配网络,实验二是分支线匹配器,实验三为四分之一波长阻抗变换器。实验四是低通滤波器,实验五是耦合微带线带通滤波器,实验六和实验七是功率分配器和分支线定向耦合器,实验八和实验九是低噪声放大器和宽频带放大器。

在以上设计仿真的基础上,第二章是微波器件的测试实验,能使学生真实地接触到硬件测试的过程,加强电磁场与微波测量技能的训练,提高学生的动手能力。实验内容包括:波长和反射系数的测量、阻抗的测量、滤波器测试和定向耦合器测试。

最后感谢深圳安泰信电子有限公司对本书的支持和帮助;感谢北京邮电大学出版社的同志们为本书的出版所付出的辛勤劳动。

由于作者水平有限,书中的不足之处在所难免,诚恳地希望读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 微波器件设计与仿真	(1)
1.1 Microwave Office 系统介绍	(1)
1.2 实验一 L 型匹配网络	(17)
1.3 实验二 分支线匹配器	(30)
1.4 实验三 四分之一波长阻抗变换器	(37)
1.5 实验四 低通滤波器	(44)
1.6 实验五 耦合微带线带通滤波器	(58)
1.7 实验六 功率分配器	(70)
1.8 实验七 分支线定向耦合器	(73)
1.9 实验八 低噪声放大器	(80)
1.10 实验九 宽频带放大器	(93)
第 2 章 微波器件测试	(98)
2.1 实验十 波长和反射系数测量	(98)
2.2 实验十一 阻抗测量	(103)
2.3 实验十二 滤波器测试	(107)
2.4 实验十三 定向耦合器测试	(111)
附录	(116)
附录 1 最平坦低通原型的归一化元件值	(116)
附录 2 等波纹低通原型的归一化元件值	(116)
附录 3 最平坦低通原型滤波器阻带衰减频率特性	(118)
附录 4 等波纹低通原型滤波器阻带衰减频率特性	(118)
附录 5 耦合微带线设计曲线	(120)
附录 6 切比雪夫多节阻抗变换器设计表	(121)
附录 7 AT5011+ 频谱仪介绍	(125)
参考文献	(130)

第 1 章 微波器件设计与仿真

本章的实验是利用 Microwave Office 软件优化设计微波器件。首先以射频微波电路设计理论为依据,根据设计要求,确定原始设计方案。其次利用 Microwave Office 软件对原始设计方案的模型进行计算机仿真,包括建立等效的电路模型、仿真分析、评估性能指标等。然后检验是否满足设计的指标要求,改进和完善原始设计方案。最后对改进的设计方案的模型再进行计算机仿真,直到指标性能能够满足要求,完成设计。

实验分为实验目的、实验原理、实验内容、实验步骤和实验报告要求。实验原理详细介绍了微波器件的工作原理、分析方法及设计思路等,为确定原始设计方案提供了理论依据。实验内容提出了设计的目标,实现的功能和性能指标要求。实验步骤是利用 Microwave Office 软件仿真分析、优化设计的过程:根据设计指标要求→确定原始设计方案→利用 Microwave Office 软件进行仿真分析→评估其性能指标→检验设计是否满足要求→调整和改进原始设计方案→Microwave Office 仿真分析→性能指标满足要求,完成设计。

下面首先系统地介绍 Microwave Office 仿真软件,然后是微波器件的设计与仿真实验。

1.1 Microwave Office 系统介绍

计算机仿真已经成为微波电路的分析、设计和优化的不可缺少的工具,市面上出现了许多微波仿真软件,常用的微波仿真软件有 Microwave Office(Applied Wave Research 公司)、SERENADE(Ansoft 公司)、ADS(Agilent Technologies 公司)等。

Microwave Office 是美国 AWR 公司(应用波研究所)开发的仿真软件,适用于设计和仿真在射频、微波、毫米波频率范围的多种复杂电路或电磁结构,包括线性电路、非线性电路、电磁结构(EMSIGHT)、生成布线图等。Microwave Office 软件具有快速、精确地仿真分析的功能,其中一个特点是可以实时地调节元件或变量的参数值,调节参数值所引起的变化可以

实时地显示在输出的图形中。还可以通过设定优化目标,对元件或变量的参数值进行优化,优化的结果随参数值的改变而实时显示。

Microwave Office 的另一个特点是具有一个功能非常强大的元器件模型库,并且在程序中可以直接调用库中的元器件模型。库里的元器件模型涵盖的内容十分广泛,几乎包括了所有类型的元器件模型,例如,集总参数元件:电阻、电容、电感等。分布参数元件:同轴线、微带线、带状线、衬底基材等。器件:二极管、晶体管、场效应管等。模块:放大器、混频器、滤波器、衰减器、功分器等。另外还有独立源和受控源模型、端口模型、噪声元器件模型、测量工具等多种模型。

Microwave Office 提供了一个直观的用户界面,软件设计环境包括主菜单与工具栏、项目浏览页、元件浏览页、变量浏览页等;基本操作包括建立项目、绘制原理图、添加图、添加测量、仿真分析等。下面重点介绍。

一、Microwave Office 设计环境

1. 主窗口

当 Microwave Office 软件被启动后,计算机显示如图 1.1.1 所示的主窗口。

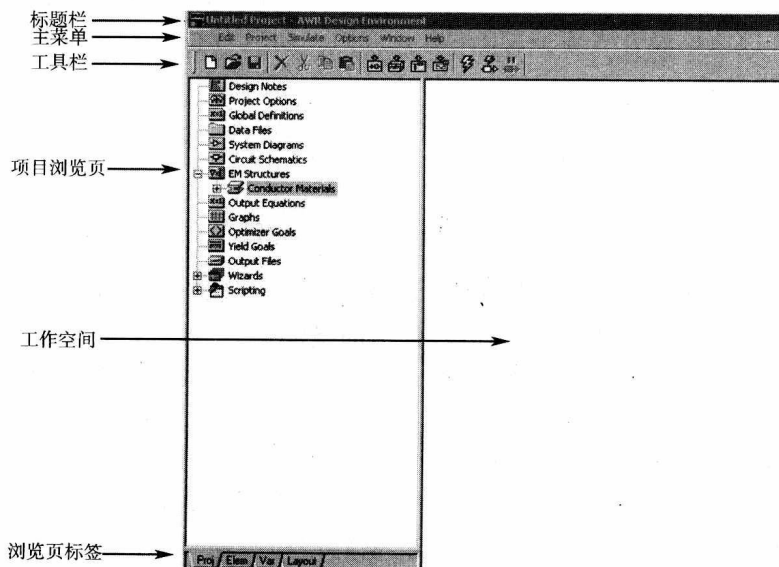


图 1.1.1 Microwave Office 主窗口

在主窗口下,可以进行一系列的操作,如建立线性、非线性电路原理图、电磁结构图、印制板布线图,运行仿真程序,显示输出图形,以及优化设计等。

主窗口的最顶端是标题栏,即项目名称。标题栏的下面是主菜单,用于执行命令,来启动 Microwave Office 完成各种任务,主菜单包括 File、Edit、Project 等菜单。许多菜单选项或命令可以通过主菜单进入,也可以通过工具栏或项目浏览器进入。

在主菜单下方,工具栏提供了一个快捷的方式来执行常用的菜单命令选项,如建立原理图,运行仿真程序,调谐参数值或变量等。工具栏将根据激活窗口的不同而动态地更新,例如,假如一个 schematic 窗口是激活的,工具栏就会提供一些与 schematic 窗口操作有关的按钮。假如一个 EM 结构被选定,工具栏会提供一些为 EM 分析使用的按钮。

主窗口的左侧为浏览页,包括项目浏览页、元器件浏览页、变量浏览页、布线管理浏览页。在项目浏览页,收集当前项目所定义的全部数据,包括原理图、EM 结构、仿真频率设置,以及输出图形、组织结构等。打开 Microwave Office 时,项目浏览页总是被激活的。

主窗口右侧空白区为绘图工作区,在这个区域内可以设计原理图、画 EM 结构图、观察图形、编辑布线图选项等。

主窗口左侧底部是各浏览页的标签,用于切换主窗口左侧的功能。例如从项目浏览页(Proj)、到元器件浏览页(Elem)、变量浏览页(Var)以及布线管理浏览页(Layout),单击标签即打开相应浏览页,如图 1.1.2 所示。

单击元器件浏览页标签(Elem),打开建立电路原理图的电气元器件的总目录。单击变量浏览页(Var)标签,调谐或优化当前项目原理图中元器件的参数值或变量。单击布线管理器(Layout)标签,指定布线图的相关选项,用于观看、画布线图、产生布线图的新元素。

2. 项目浏览页

单击主窗口左下角的“Proj”标签,即可激活项目浏览页,包括项目的全部选项和获取的数据,为分层结构,如图 1.1.2(a)所示,包括原理图、系统框图、EM(电磁)结构,以及仿真的频率设置和输出图形等。当第一次打开 AWR 软件时,首先激活项目浏览页,右击进入项目组相关的命令菜单。项目浏览页选项包括以下内容。

(1) Design Note(设计记事本)

用一个简单的文本编辑板来对 Project 进行说明。

(2) Project Options(项目选择)

Frequency Values 指定了一个 Project 中进行的所有线性,非线性仿真或 EM 仿真的默认频率范围,Global Units 设定单位。

(3) Global Definitions(全局参数定义)

在 Project 界面的 Global Equation 下。双击打开对话框,在这里定义的所有公式或方程中的参数值可以用于 Project 其他任何地方。

(4) Data Files(数据文件)

包括已经添加到项目的所有数据文件的列表,数据文件是典型的 S 参数文件,或其他类型的端口参数文件。

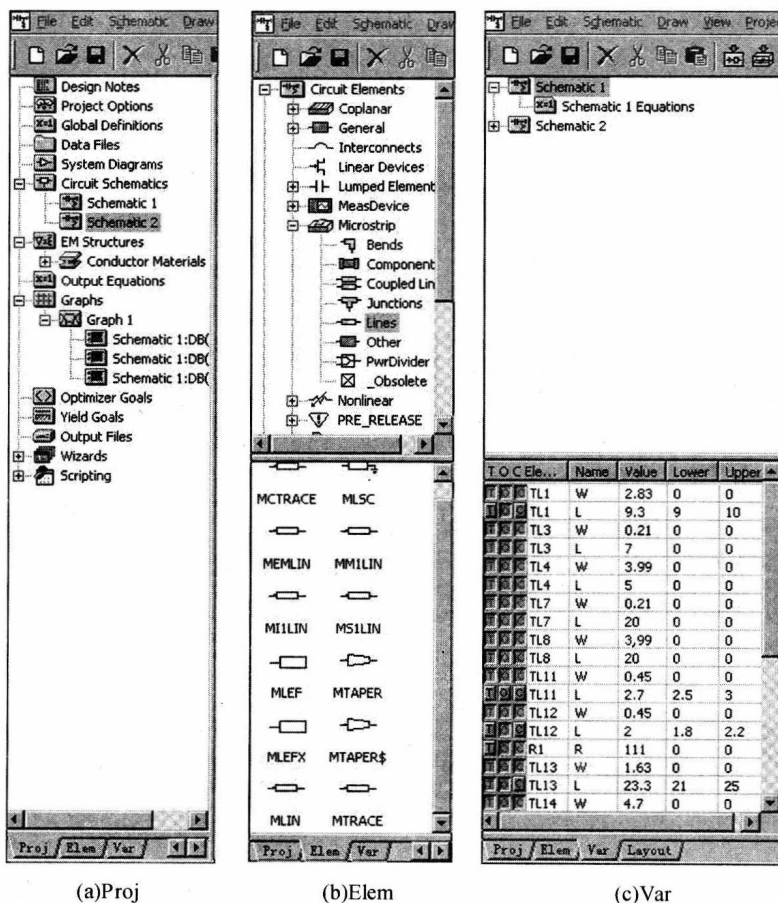


图 1.1.2 主窗口左侧浏览页

(5) Circuit Schematics(电路原理图)

包括所有的添加到项目的电路原理图。每个项目可以包含多个电路原理图,均作为子项列在 Circuit Schematics 组下。

(6) EM Structures(电磁结构)

包括所有的添加到项目的电磁结构,每个项目可以包含多个电磁结构,作为子项的形式被组织在 EM 组的主目录下。导体和介质材料的属性可以在这里设定。

(7) Output Equations(输出方程)

在 Project 界面的 output equation 下,双击打开对话框,这个区域的主要目的是提供一个定义输出方程的地方,也可以是其他的方程。

输出方程将一个测量的结果赋予一个变量,这个变量不是全局的,不能在其他项目中使用。下面的范例定义了一个名为“s-data”的变量,用一个放大器的 S11 参数给它赋值: $s\text{-data} = \text{Amp1}:[1,1]$ 。仿真以后,这个变量将会是一个对应每一个仿真频率点采样的复数值的 S 矩阵。

在这里定义的变量只能在这个区域内被引用,或被测量方程引用,测量方程可以将变量值绘制在图中,即在输出方程中的变量,可以被测量并且以图的形式显示出来。如在史密斯圆图上画一个模值为 0.5 的等反射系数圆。首先在输出方程中写入如下语句:

$b = \text{stepped}(0, 2 * \pi, 0.01)$ (定义相角变量 b 从 0 到 2π ,步长为 0.01 弧度)

$r = 0.5 * \exp(j * b)$ (r 表示模值为 0.5,相角为 b 的变量)

然后对输出方程中的变量 r 进行测量,在史密斯圆图中就显示出模值为 0.5 的等反射系数圆。

(8) Graph(图)

将电路或系统仿真的结果用各种图形来表示,图形代表了 Microwave Office 的输出。在执行仿真之前,首先要建立一张图,以便将指定的数据或测量绘制在这张图上,测量包括增益、噪声系数或 S(散射参数)等。图表类型有如下六种:

Rectangular(直方图):将测量项显示在 X-Y 轴直角坐标。

Smith Chart(史密斯圆图):将阻抗、导纳及反射系数显示在一个圆内。

Polar(极坐标图):幅度与角度。

Histograms(柱状图):将测量项显示为柱状。

Antenna Plot(天线方向图):显示天线的方向图。

Tbular(表格图):将测量项列表显示,通常相对于频率。

(9)Optimized Goals(优化目标)

用来输入项目的期望值,目标可以是项目中的任何测量项和输出方程中的参数。右击 Optimized Goals,从弹出的菜单选择 Add Opt Goal,出现新的优化目标对话框如图 1.1.3 所示,优化的对象是(在测量列表中选择) bpf1:DB(|S[1,1]|),代表 bpf1 的端口参数 $|S_{11}|$ 取对数,优化目标为:在 5.7~6.3GHz 频率范围内 $20\lg|S_{11}| < -20\text{dB}$ 。

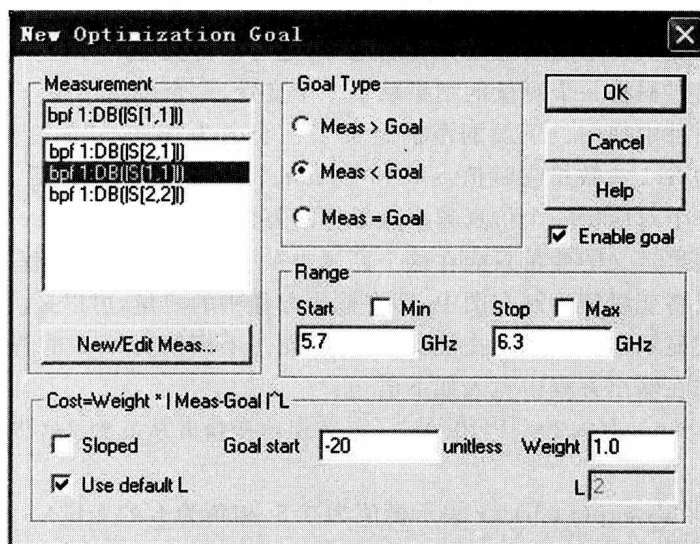


图 1.1.3 添加优化目标对话框

(10)Yield Goals(成品率目标)

用来确定成品率目标的期望值。目标可以是项目中任何测量项和输出方程中的参数。

(11)Output Files(输出文件)

将电路和电磁分析结果写成标准的 S 参数格式。EM 结构可以产生 Spice 等效电路。非线性仿真可以输出 AM-AM 和 AM-PM 数据。

(12)Wizards (设计向导)

Wizards 模块位于项目浏览页的左下方,用于自动设计电路、测量等,通过自动链接数据库文件,执行自动化的程序任务,扩充 Microwave Office

的功能。包括滤波器综合向导、负载牵引向导和扫描变量向导。

利用滤波器综合向导(Filter Synthesis Wizard),可以设计各种响应类型如最平坦、切比雪夫等的滤波器,包括带通、带阻、高通、低通滤波器。通过自动程序向导设置滤波器的参数(阶数、带宽、带内波纹等),滤波器的实现方式(集总元件、微带线、带状线等),以及一些限制条件等。程序向导执行完以后,产生滤波器的电路图和测量图形,以及项目中用于仿真分析和优化的选项。

3. 元件浏览页

单击图 1.1.1 所示的主窗口左下角的“Elem”标签,即可激活元件浏览页,如图 1.1.2(b)所示,元件浏览页提供一个综合的分级结构的数据库,对于电路图提供的是电路元器件;对于系统框图,提供的是系统模块。元器件库提供了非常广泛的各种电气元件模型,以及来自于生产厂家的 S 参数文件。电路元器件是在电路图中用于线性和非线性仿真的各种模型,如集总参数元件、分布参数元件、信号源、各种端口、探头、测量装置以及数据库等;系统模块包括各种信道模型、数学工具、测量器、子电路,以及其他的各种系统仿真模型。

元件浏览页分成上、下两部分。上半部分包括电路元器件和系统框图,如单击电路元器件可展开元器件总目录,类似于 Windows 浏览器,单击“+”、“-”符号可展开或收缩目录。元器件总目录分为各种子目录,如线性元件、非线性元件、集总元件(Lumped Element)、微带线(Microstrip)、传输线、信号源、元件数据库以及测量仪器等,具体的元器件模型按照子目录分类排列。下半部分是具体的元件模型。

4. 变量浏览页

单击图 1.1.1 所示的主窗口左下角的“Var”标签即可激活变量浏览页,如图 1.1.2(c)所示。在变量浏览页里可以查看、更改在原理图中的各个元件参数或变量的当前值,这些值可以用于调谐或优化。

变量浏览页分为上、下两部分。上半部分包括原理图及公式列表。下半部分的左 3 列按钮分别为“T”调谐,“O”优化、“C”约束,可将元件参数设为调谐变量或优化变量,按钮弹起为选中,此时“T”变为蓝色,“O”变为红色,“C”变为紫色。若要限制一个变量的取值范围,要单击“C”约束按钮,并在对应的行中输入上、下限(Upper、Lower)的值。

方程是定义了变量的图形对象,一个变量可以被赋予一个常数或任何

有效的数学表达式。方程可以添加到下面几种 Project View 对象中：

- Global Equation(全局方程)；
- Output Equation(输出方程)；
- Schematics(原理图)；
- Netlist(网表图)。

(1)生成方程

首先打开一个全局方程或输出方程或 Schematics 的界面,选择 Adding Equation 或单击 EQN 工具条按钮,在界面上单击应该放方程的位置,并输入方程,当完成后按 Enter 键。方程可以通过两种方法进行编辑:在方程的位置上编辑或通过对话框。双击方程,就会出现一个矩形文本编辑框。将方程进行修改后按 Enter 键。

(2)方程句式

方程的基本形式是变量名在赋值操作数的左边,一个数学表达式在右边。表达式的句法要遵循一般的代数规则,如果表达式无效,那么表达式将用绿色显示并且在出错窗口里显示出错误。假如方程不可见,就双击出错窗口中的错误,方程将会显示出来。方程在屏幕上的安排顺序决定了它们的运算优先权,在一个方程中用到的变量需要在运算顺序上比该方程先出现,这个顺序以下面规则定义:

低优先级方程将被放在高优先级的后面;

如果两个方程在一页同一行,那么右边的优先级较高;

假如一个在方程中用到的变量被定义过不止一次,那么它的值将是在方程应用之前最近被定义的值。在下面的例子中 b 的值是 2, c 的值是 3。

$a=1 \quad a=2 \quad b=a$

$a=3$

$c=a$

(3)运算符号

+ 加

- 减

* 乘

/ 除

^ 幂次

(4) 函数

$\sin(x)$	弧度 x 的正弦
$\cos(x)$	弧度 x 的余弦
$\tan(x)$	弧度 x 的正切
$\sinh(x)$	弧度 x 的双曲正弦
$\cosh(x)$	弧度 x 的双曲余弦
$\tanh(x)$	弧度 x 的双曲正切
$\arcsin(x)$	反正弦函数
$\arccos(x)$	反余弦函数
$\arctan(x)$	反正切函数
$\exp(x)$	x 的自然指数
$\log(x)$	x 的自然对数
$\log_{10}(x)$	以 10 为底的 x 的对数
$\text{sqrt}(x)$	x 的平方根

(5) 复数表示法

一个变量可以使用虚全局常量 i 或 j 作为因子, 被赋予一个复数值, i 或 j 由 -1 的平方根定义的虚数。例如:

$z = 50 - j \times 1.3$ 。

$-PI$ 代表数学常数 $\pi(3.1415925)$ 。

5. 布线管理浏览页

单击图 1.1.1 所示的主窗口左下角的“Layout”标签即可激活布线管理浏览页。布线管理浏览页分为上、下两部分。

布线管理浏览页上半部分包括 Layer Setup、Layout Options 和 Cell Libraries, 如图 1.1.4 所示。

Layer Setup: 编辑绘图层, 包括布线窗中所有与绘图相关的功能。

Layout Options: 编辑布线的相关选项。

Cell Libraries: 可生成、导入布线元件, 布线元件库可按 GDSII 或 DXF 格式输入。新元件可在绘图编辑器中生成, 并在此激活。

布线管理浏览页的下半部分是 Draw Layers 页, 包括能在布线窗中激活并浏览各层的各种控制选项。

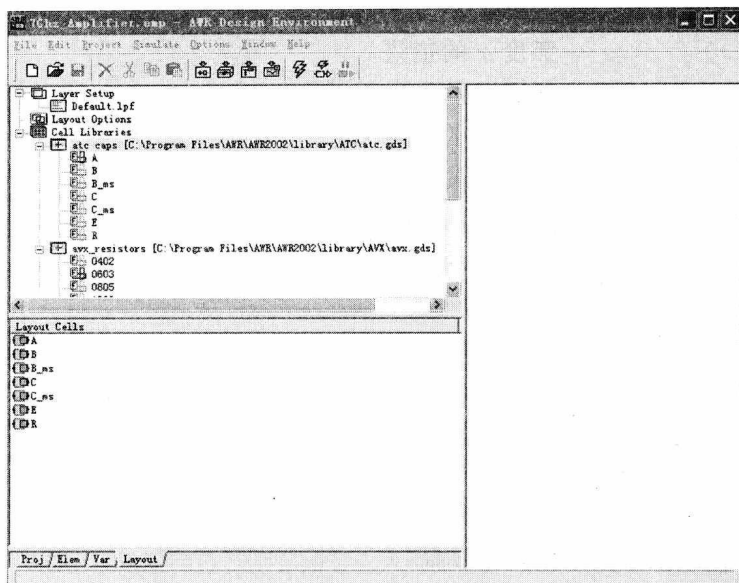


图 1.1.4 布线管理浏览页

Layer Setup 对话框:在布线管理浏览页双击 Layer Setup(绘图层设置),可打开 Layer Setup 对话框如图 1.1.5 所示。Draw Layers 包括绘图层名称、线条颜色、填充颜色、线型、层的模式、显示、填充、层锁定等选项,可显示及隐藏各层,也可激活某层以便绘图或编辑。

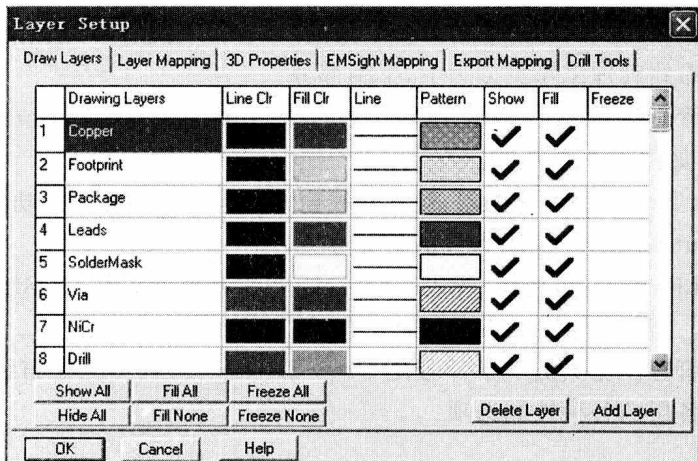


图 1.1.5 绘图层的设置

二、基本操作

1. 项目

一个项目可包含一系列的设计、一个或多个线性或非线性电路原理图、EM(电磁)结构、系统模块,以及相关的全局变量、输入文件、生成布线图和输出图形等。项目包括了所有在仿真过程中用到的成分和设置,如电路原理图、电磁结构图、测量图、变量、工作频率等,也包括此项目内不同实体的层次关系。项目内大多数实体都可以通过在项目浏览页内双击该项目图标来编辑。

(1) 创建及保存新项目

从主菜单中选择 File\New Project 创建一个新项目,选择 File\Save Project As,则以新名称保存该项目,扩展名为 *.emp 文件。一个项目可以包括多个电路原理图和多个电磁结构图。当软件被启动后,一个未命名的项目被载入,通常未命名的项目是空白的,当然也可以按用户需要自定义启动一个项目。本软件一次只能装载一个项目。

(2) 设定项目单位和频率

从主菜单中选择 Options\Project Options,选择 Global Units 页,通过增加或缩小默认设计单位来编辑项目的全局默认单位。对长度单位来说,用公制单位需勾选“Metric Units”,否则为英制单位。改变单位不会影响元件参数的值。

2. 原理图

项目浏览页中的 Circuit Schematics 组包括两种文件:Schematic 和 Netlist。

Schematic:电路原理图,项目的每个原理图在 Circuit Schematics 组里都有相应的原理图项。

Netlist:网表图,将电路图以网表形式用文字描述。项目的每个网表图在 Circuit Schematics 组里都有相应的网表项。

(1) 添加原理图

在项目浏览页右击 Circuit Schematics 组,有以下选项:

New:创建原理图。

Import:导入文件,即将某文件复制并作为本项目的永久文件。原理图文件的扩展名为 *.sch,网表文件的扩展名为 *.net。

Link:链接文件,能处理文件但不复制到项目中,该文件必须始终适于项目读取,当其他用户更改该文件时,允许当前项目保留数据不变。