精益设计
Lean Design

〔日〕三谷政昭・著
彭 刚・译

模拟滤波器设计

从Scilab编程到执行
斯滤波器
切比雪夫滤波器

反切比雪夫滤波器
联立切比雪夫滤波器
模拟滤波器的传递函数设计

科学出版社

精益设计

模拟滤波器设计

〔日〕三谷政昭　著

彭刚　译

科学出版社

北京

图字：01-2013-1079号

内 容 简 介

本书主要介绍各种滤波器的设计技巧，内容包括：Scilab的基本命令及编程方法，滤波器的分类，模拟滤波器的特性解析，模拟滤波器的基本传递函数及特性，巴特沃斯滤波器、切比雪夫滤波器、反切比雪夫滤波器、联立切比雪夫滤波器的设计步骤，高通滤波器、带通滤波器、带阻滤波器的设计，以及按照设计规格进行各种滤波器设计的具体步骤。本书将数学式图形化，将发生的现象直观真实地呈现在读者面前，希望读者在学习滤波器设计的同时，掌握Scilab的使用方法，达到一箭双雕的效果。

本书可作为信号处理、信息通信等相关领域工程技术人员的参考书，也可供工科院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

模拟滤波器设计/（日）三谷政昭著；彭刚译.—北京：科学出版社，2014.6

（精益设计）

ISBN 978-7-03-040598-2

Ⅰ.模… Ⅱ.①三…②彭… Ⅲ.滤波器 Ⅳ.①TN713

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第095714号

责任编辑：杨 凯 / 责任制作：魏 谨
责任印制：赵德静 / 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

北京画中画印刷有限公司 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2014年6月第 一 版 开本：720×1000 1/16
2014年6月第一次印刷 印张：14
印数：1—3500 字数：267 000

定价：38.00元
（如有印装质量问题，我社负责调换）

安徽理工大学图書館 藏書

前　言

无论是模拟信号还是数字信号，信号处理技术在通信、音频处理、图像处理、控制、测量等各种领域里毋庸置疑是广泛使用的关键技术，因此，现今急需熟练掌握这门技术并运用自如的专家。

笔者所著《基于Scilab的数字信号处理学习》（日本CQ出版社，2006年7月）出版已经过了2年多的时间，然而，读者们强烈反映“若是能有系统地解说滤波器设计的基本原理和步骤的书多好啊”，因此为满足读者们的需求，决定出版本书。本书是笔者在CQ出版社发行的杂志《Interface》2006年9月刊上发表的专栏文章《模拟信号与数字信号滤波器设计入门》内容的扩充，将模拟信号与数字信号联系起来，对滤波器理论与设计进行详尽的解说。

本书共8章，为了使读者能通过自学基本理解滤波器处理的基础知识，独自进行滤波器设计，笔者在力求解说浅显易懂方面费尽了心思。

第1章介绍了用于高性能数值计算的免费软件——“Scilab”的基本命令及编程方法，对滤波器特性解析及设计工具的使用方法进行了说明。

第2章及第3章，将模拟滤波器和数字滤波器进行了对比，列举了根据滤波器特性进行分类的方法。第4章介绍了模拟滤波器的特性解析，对于频率特性、拉普拉斯变换、传递函数等内容，利用Scilab的解析工具进行了可视化说明。

第5章讲解模拟滤波器的基本传递函数及特性。在第5章的基础上，第6章主要介绍各种原型滤波器的设计步骤，包括巴特沃斯（Butterworth）滤波器、切比雪夫滤波器（Chebyshev）、反切比雪夫（Chebyshev filters inverted filter）滤波器、联立切比雪夫（Elliptic filter）滤波器等。

第7章主要介绍根据原型低通滤波器（Prototype Low-pass filter）频率变换，进行高通（High pass）、带通（Band pass）、带阻（Band eliminate）等各种滤波器的设计。

第8章主要介绍按照设计规格进行各种滤波器设计的具体步骤，希望读者能够实际体验具有各种各样频率特性的模拟滤波器（Analog filter）的设计流程。

解说过程中，为了避免仅仅空谈基于数学式的设计理论，笔者着力于利用Scilab，在电脑上将数学式图形化，将发生的现象直观真实地呈现在读者面前。

笔者希望读者通过学习滤波器设计同时掌握Scilab的使用方法，达到一箭双雕效果。

另外，第2章、第4章、第5章的模拟滤波器的部分内容，可以用（株式会社）Micronet的模拟电子电路模拟器（Circuit Viewer）进行模拟，确认输入输出信号的波形和频率特性。

最后，对本书在规划、出版时给予了多方帮助的CQ出版社的山形孝雄先生致以由衷的感谢。

三谷政昭

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

科学出版社

科龙图书读者意见反馈表

书　　名 _____

个人资料

姓　　名：_____　年　　龄：_____　联系电话：_____

专　　业：_____　学　　历：_____　所从事行业：_____

通信地址：_____　邮　编：_____

E-mail：_____

宝贵意见

◆ 您能接受的此类图书的定价

20 元以内□　30 元以内□　50 元以内□　100 元以内□　均可接受□

◆ 您购本书的主要原因有(可多选)

学习参考□　教材□　业务需要□　其他_____

◆ 您认为本书需要改进的地方(或者您未来的需要)

_____

_____

◆ 您读过的好书(或者对您有帮助的图书)

_____

_____

◆ 您希望看到哪些方面的新图书

_____

_____

◆ 您对我社的其他建议

_____

_____

谢谢您关注本书！您的建议和意见将成为我们进一步提高工作的重要参考。我社承诺对读者信息予以保密，仅用于图书质量改进和向读者快递新书信息工作。对于已经购买我社图书并回执本“科龙图书读者意见反馈表”的读者，我们将为您建立服务档案，并定期给您发送我社的出版资讯或目录；同时将定期抽取幸运读者，赠送我社出版的新书。如果您发现本书的内容有个别错误或纰漏，烦请另附勘误表。

回执地址：北京市朝阳区华严北里 11 号楼 3 层

科学出版社东方科龙图文有限公司电工电子编辑部(收)

邮编：100029

目 录

第1章 Scilab入门 —— 1

1.1 Scilab …… 1
1.2 基于Scilab基本命令的处理 …… 2
1.2.1 输入、输出表示 …… 2
1.2.2 特定常数 …… 5
1.2.3 运算符表示与比较运算表示 …… 6
1.2.4 声音、图像的信号数据 …… 6
1.2.5 信号数据的读取 …… 9
1.2.6 信号数据的矩阵运算 …… 10
1.2.7 信号数据处理 …… 11
1.2.8 信号数据元素运算 …… 12
1.2.9 特殊信号数据 …… 13
1.2.10 信号波形的图形表示 …… 15
1.3 从Scilab编程到执行 …… 17
1.4 Scilab对多项式的程序记述 …… 19
1.4.1 多项式的定义与根的运算 …… 19
1.4.2 多项式的加减乘除及微分（导数）的运算 …… 20
1.4.3 多项式代入运算 …… 22
1.4.4 有理函数的程序记述 …… 23
1.5 函数定义与滤波器解析工具函数库 …… 24
小知识1 便捷的输入功能 …… 4
小知识2 非正常提示符状态的恢复处理 …… 10
小知识3 重新设置Scilab …… 22

第2章 模拟滤波器和数字滤波器 —— 27

2.1 滤波与频率特性（增益、相位） …… 27
2.2 模拟滤波器基础 …… 31
2.2.1 *RC*电路滤波 …… 32
2.2.2 积分滤波器 …… 34

2.2.3 微分滤波器 …… 35
2.3 数字滤波器基础 …… 36
2.3.1 四则运算与输入输出的关系 …… 36
2.3.2 移动平均滤波器 …… 41
2.3.3 移动差分滤波器 …… 45

第3章 滤波器的各种特性及分类 —— 49

3.1 按频率特性分类 …… 49
3.1.1 滤波器的频率选择性 …… 49
3.1.2 滤波器的分类 …… 52
3.2 按增益特性分类 …… 54
3.2.1 滤波器处理的增益与频率特性 …… 54
3.2.2 滤波器设计的目标与特性曲线 …… 56
3.3 按相位特性分类 …… 59
3.3.1 滤波器处理的相位特性 …… 59
3.3.2 全通滤波器的相位特性 …… 60
3.3.3 线性相位与非线性相位程序示例 …… 62
3.4 按构成方式分类 …… 64
3.4.1 无源滤波器 …… 64
3.4.2 有源滤波器 …… 64
3.4.3 数字滤波器 …… 65
小知识4 dB（分贝）的定义 …… 57
小知识5 程序运行时出现异常状态后如何强行终止 …… 68

第4章 解析模拟滤波器特性的便利工具 —— 69

4.1 特性解析的基础——复数的向量表示（极坐标）…… 69
4.2 频率特性的数学式表示 …… 74
4.2.1 直角坐标与极坐标 …… 74
4.2.2 增益特性 …… 75

4.2.3 相位特性 …… 76
4.3 模拟信号与拉普拉斯变换 …… 78
4.4 信号输入输出与微积分方程式 …… 83
4.5 传递函数与脉冲响应 …… 87
4.5.1 脉冲响应 …… 88
4.6 各种输入信号的输出响应 …… 90
4.6.1 阶跃响应 …… 91
4.6.2 正弦波响应 …… 92
4.6.3 方波响应 …… 93
4.7 传递函数与频率特性 …… 94
4.8 电子电路模拟器“Circuit Viewer” …… 98

第5章 模拟滤波器的基本传递函数及其性质 ——— 101

5.1 模拟滤波器的传递函数 …… 101
5.1.1 1阶LPF …… 101
5.1.2 1阶HPF …… 103
5.1.3 1阶APF …… 105
5.1.4 2阶LPF …… 107
5.1.5 2阶HPF …… 110
5.1.6 2阶BPF …… 112
5.1.7 2阶BEF …… 115
5.1.8 2阶APF …… 117
5.2 极点和零点的物理意义 …… 119
5.2.1 极点的制约（模拟滤波器的稳定性） …… 119
5.2.2 零点的性质 …… 121
5.2.3 极点、零点与频率特性 …… 123
5.3 模拟滤波器实验室 …… 124

第6章 各种原型滤波器 —— 127

6.1 巴特沃斯滤波器 …… 127
6.2 切比雪夫滤波器 …… 131
6.3 反切比雪夫滤波器 …… 137
6.4 联立切比雪夫滤波器 …… 142

第7章 基于频率变换的各种模拟滤波器的导出 —— 151

7.1 原型（基准）低通滤波器 …… 151
7.2 低通到低通的变换 …… 152
7.3 低通到高通的变换 …… 156
7.4 低通到带通的变换 …… 158
7.5 低通到带阻的变换 …… 161

第8章 模拟滤波器的传递函数设计 —— 165

8.1 低通滤波器的传递函数设计 …… 165
8.1.1 巴特沃斯型LPF …… 165
8.1.2 切比雪夫型LPF …… 171
8.1.3 反切比雪夫型LPF …… 175
8.1.4 联立切比雪夫型LPF …… 179
8.1.5 各种滤波器特性必要阶数的比较 …… 181
8.1.6 低通到低通频率变换的设计 …… 183
8.2 HPF（高通滤波器）的传递函数设计 …… 187
8.3 BPF（带通滤波器）的传递函数设计 …… 189
8.4 BEF（带阻滤波器）的传递函数设计 …… 192
8.5 各种模拟滤波器的设计程序 …… 196

附 录 Scilab从安装到运行 —— 205

参考文献 …… 211

第1章 Scilab 入门

通过实例，介绍本书使用的 Scilab 这一免费模拟软件的使用方法。

对滤波器的特性进行解析，并介绍输出 / 输入信号波形的图形表示的基本命令，巩固 Scilab 编程基础，使读者能够独立编写信号处理的程序。

1.1 Scilab

Scilab是由INRIA（法国国立信息学自动控制研究所）开发并提供的极为便捷的模拟软件。有着丰富的图形表示功能，且编程十分简单。有关Scilab的完整信息以及使用方法可参阅http://www.scilab.org/fr/（图1.1）。

利用Scilab，可以很简单地将信号波形和频率特性等表示在电脑屏幕上，可实现“尝试、体验、亲眼确认”（图1.2）。换句话说，为了能够直观地掌握信号处理的过程，准备了大量用来解析滤波器、表示图形的命令。

例如：

```
--> x = 0:0.1:2*%pi;
--> plot(cos(x), sin(3*x));
```

只要输入以上命令，就能描绘出如图1.3所示的Lissajous曲线。后面进行实际体验的话，读者一定会感叹“超棒的软件！”。

Scilab的安装请参考附录。下面以读者能够使用Scilab为前提进行解说。

图1.1　Scilab的网页（2008年11月）

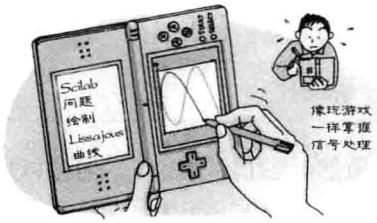


图1.2　Scilab好似用来进行信号处理的游戏软件

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

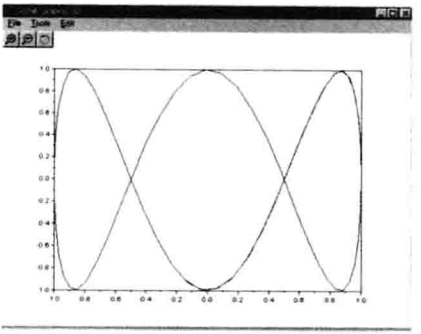


图1.3　Lissajous曲线的图形表示

1.2　基于 Scilab 基本命令的处理

为了使用Scilab，首先对Scilab基本命令的处理内容和使用方法进行说明。

1.2.1　输入、输出表示

例如，把数值123.4赋值给变量时，表记为a = 123.4。另外，需从键盘输入的文字和符号等用灰色方框“　　”作为标记。

实例1.1

```
--> a = 123.4
```

按下回车键“↵”，显示出代入的结果。

实例1.2

```
--> a = 123.4↵
  a =
    123.4
```

另外，输入表记为1.234×10^{-5}的数值时，指数部分用e表示。

实例1.3

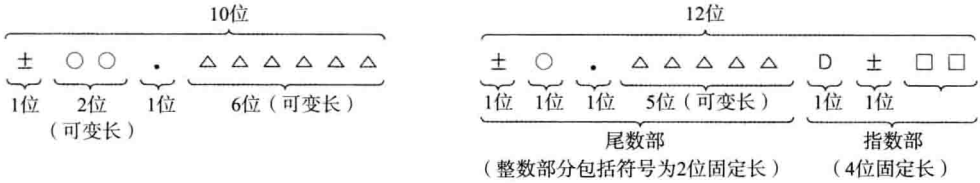
```
--> a = 1.234e-5↵
  a =
    0.0000123
```

此时，虽然4没有表示出来，但可以用format命令来变更表示形式。format命令的第一个参数为‘v’或‘e’可指定是否显示指数部，第二个参数指定输出时表示的位数上限。位数包含数值符号（±），小数点（.），指数部符号（D）（图1.4）。

另外默认值（既定值）为format（‘v’，10），超过表示位数上限的部分四舍五入后输出。

实例1.4

```
--> format('v',5)↵
--> a = 1.234e-5↵
  a =
     0.00
--> format('v',12)↵
--> a = 1.234e-5↵
  a =
     0.00001234
--> format('e',12)↵
--> a = 1.234e-5↵
  a =
     1.23400D-05
--> format('v',10);// 返回默认值
```



（a）format（‘v’，10）的情况　　（b）format（‘e’，12）的情况

图1.4　format命令各参数的含义

在Scilab中，由于两个连续的斜线符号（ // ）后面记述的文字视为注释，所以内容对程序运行结果不产生影响。但是，由于日文字体等2字节编码的文字会引起乱码，所以输入时原则上使用英语字母和符号。

实例1.5

```
--> a = 9     // real number↵
  a =
     9.
```

以对话的方式运行的时候，处理结果依次在画面里表示出来，十分方便，但是作为程序运行，或处理大量数据时显示画面会出现滚动条，不方便查看。此种情况下，在行末标上分号（ ; ），处理的结果就不会显示，只显示处理命令。

在Scilab中，变量名区分大小写，因此也可以出现“A”与“a”同时存在的情况。

实例1.6

```
--> format('v',10)↵
--> a = 1.2;↵
--> A = 8.9;↵
--> a + A↵
  ans =
     10.1
--> b = a - A↵
  b =
   -7.7
--> disp(a * A)↵
     10.68
--> disp(a * A);↵
     10.68
```

当变量b代入数值或者计算结果时，输出结果表示为“b =”，当没有代入时，输出结果表示为“ans =”。

另外，在只需要表示结果时，用disp命令。但是在用disp命令的时候，行末即使标上分号处理结果也会表示出。

而且，在一行里写入多数命令时，用逗号（,）或分号（；）隔开。这种情况下，用逗号可输出结果，用分号则不能输出结果。

实例1.7

```
--> a = 3, b = 4, c = a/b↵
  a =
       3.0
  b =
       4.0
  c =
       0.75
--> a = 3; b = 4, c = a/b;↵
  b =
       4.
```

小知识1

便捷的输入功能

如果输入时出现了错误，首先可以按向上或者向下的光标移动键，重现先前输入的文字列。然后按向左或向右的光标移动键，将光标移动至要修正的地方进行修正，用这样的方法，避免重新输入所有的文字列，利用先前输入的文字列，可以高效地只对出错的地方进行修正。另外，按home键可以把光标移动到输入文字的最前面。

当多数命令超过一行的时候，可以分成两行写，也可以在行末打上三个连续的句点（...），下一行会被视为连在一起的命令，当作一行命令来处理。

实例1.8

```
--> sum = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + ...↵
-->     7 + 8 + 9↵
  sum =
    45.0
```

1.2.2 特定常数

某些变量名被用作预定字表示特定常数（表1.1）。

表1.1 被赋值的特定常数

常数值	变量名
之前的计算结果	ans
$1+\varepsilon>1$的最小值 ε	% eps
圆周率π	% pi
自然对数的底e（=2.71828）	% e
虚数单位（$\sqrt{-1}$）	% i

实例1.9

```
--> %pi↵
  %pi =
    3.1415927
--> %i↵
  %i =
    i
--> %j = sqrt(-1)↵
  %j =
    i
--> %e↵
  %e =
    2.7182818
--> %eps↵
  %eps =
     2.220D-16
```

实例1.9中，使用求平方根的函数（根号的计算）sqrt命令，定义了表示虚数单位的变量% j。另外，满足以下关系

$$1+\varepsilon>1,\ \varepsilon>0$$

的Scilab能够处理的最小值用%eps进行了赋值（参照实例1.25）。

1.2.3 运算符表示与比较运算表示

四则运算（+，−，×，÷）及大小比较等运算使用的符号汇总成表1.2和表1.3。

表1.2 运算表示

计算公式	表记
$a+b$	a + b
$a-b$	a − b
ab	a*b
$a \div b$	a / b
a^b	a^b

表1.3 比较运算的表记（a，b为实数）

数学式	表记
$a<b$	a < b
$a \leqslant b$	a < = b
$a>b$	a > b
$a \geqslant b$	a > = b
$a=b$	a = = b
$a \neq b$	a < > b 或 a! = b
and	&
or	|

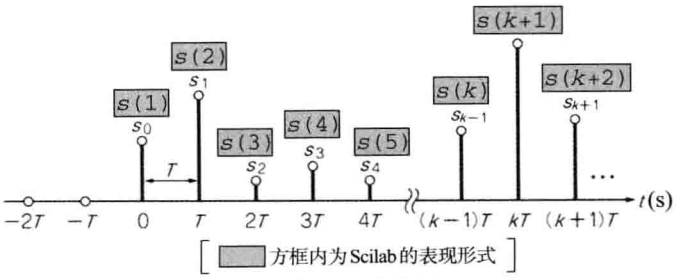
1.2.4 声音、图像的信号数据

作为Scilab的特征，音频和图像等信号数据可当作向量及矩阵看待（图1.5）。

首先，用方括号“[ ]”把行向量框起来，作为信号数据的各元素（表示信号值）用空格（或者逗号）分隔开来输入。另一方面，列向量的各元素后要加上分号。在矩阵中，每行的元素要以空格（或者逗号）分隔输入，各行的末尾输入分号即可。

实例1.10中，分别表示含有以下四个元素的行向量a（1行4列），含有四个元素的列向量b（4行1列），以及2行3列的矩阵A。

$$a=[1,\ 2,\ 3,\ 4],\quad b=\begin{bmatrix}1\\2\\3\\4\end{bmatrix},\quad A=\begin{bmatrix}5 & 6 & 7\\8 & 9 & 10\end{bmatrix}$$



（a）音频（一维信号）

图1.5 信号数据的向量、矩阵表示方式（信号数据与向量、矩阵之间的关系）

图像纵方向（列）的位置	（1	2	3	… ） 图像横方向（行）的位置
1	s(1,1)	s(1,2)	s(1,3)	…
2	s(2,1)	s(2,2)	s(2,3)	…
3	s(3,1)	s(3,2)	s(3,3)	…
4	s(4,1)	s(4,2)	s(4,3)	…
⋮）	⋮	⋮	⋮	⋱

（b）图像（二维信号）

续图1.5

实例1.10

```
--> a = [1,2,3,4]↵
  a =
  !   1.    2.    3.    4.!
--> a = [1  2  3  4]↵
  a =
  !   1.    2.    3.    4.!
--> b = [1;2;3;4]↵
  b =
  !   1. !
  !   2. !
  !   3. !
  !   4. !

--> A = [5  6  7; 8, 9, 10]↵
  A =
  !   5.    6.    7.  !
  !   8.    9.    10. !
```

另外，行的分隔也可以用换行来代替分号，实例1.11中第1行和第2行是用换行来分隔的。

实例1.11

```
--> A = [5  6  7↵
--> 8  9  10]↵
  A =
  !   5.    6.    7.  !
  !   8.    9.    10. !
```

接下来，如实例1.12所示，添加撇号'，将行向量*a*的行（横）换成相应的列（纵）后，得到列向量*b*。这是由行向量*a*转置所得，称为**向量转置**。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com