

12

Transcendental Functions

超越函数

超出代数函数范围的函数



科学只不过是日常思维的提炼。

The whole of science is nothing more than a refinement of everyday thinking.

—— 阿尔伯特·爱因斯坦 (Albert Einstein) | 理论物理学家 | 1879 ~ 1955



- ◀ matplotlib.pyplot.axhline() 绘制水平线
- ◀ matplotlib.pyplot.axvline() 绘制竖直线
- ◀ matplotlib.pyplot.contour() 绘制平面等高线
- ◀ matplotlib.pyplot.contourf() 绘制平面填充等高线
- ◀ matplotlib.pyplot.grid() 绘制网格
- ◀ matplotlib.pyplot.plot() 绘制线图
- ◀ matplotlib.pyplot.show() 显示图片
- ◀ matplotlib.pyplot.xlabel() 设定 x 轴标题
- ◀ matplotlib.pyplot.ylabel() 设定 y 轴标题
- ◀ numpy.absolute() 计算绝对值
- ◀ numpy.array() 创建 array 数据类型
- ◀ numpy.cbrt() 计算立方根
- ◀ numpy.ceil() 计算向上取整
- ◀ numpy.cos() 计算余弦
- ◀ numpy.floor() 计算向下取整
- ◀ numpy.linspace() 产生连续均匀向量数值
- ◀ numpy.log() 底数为 e 自然对数函数
- ◀ numpy.log10() 底数为 10 对数函数
- ◀ numpy.log2() 底数为 2 对数函数
- ◀ numpy.meshgrid() 创建网格化数据
- ◀ numpy.power() 乘幂运算
- ◀ numpy.sin() 计算正弦
- ◀ numpy.sqrt() 计算平方根

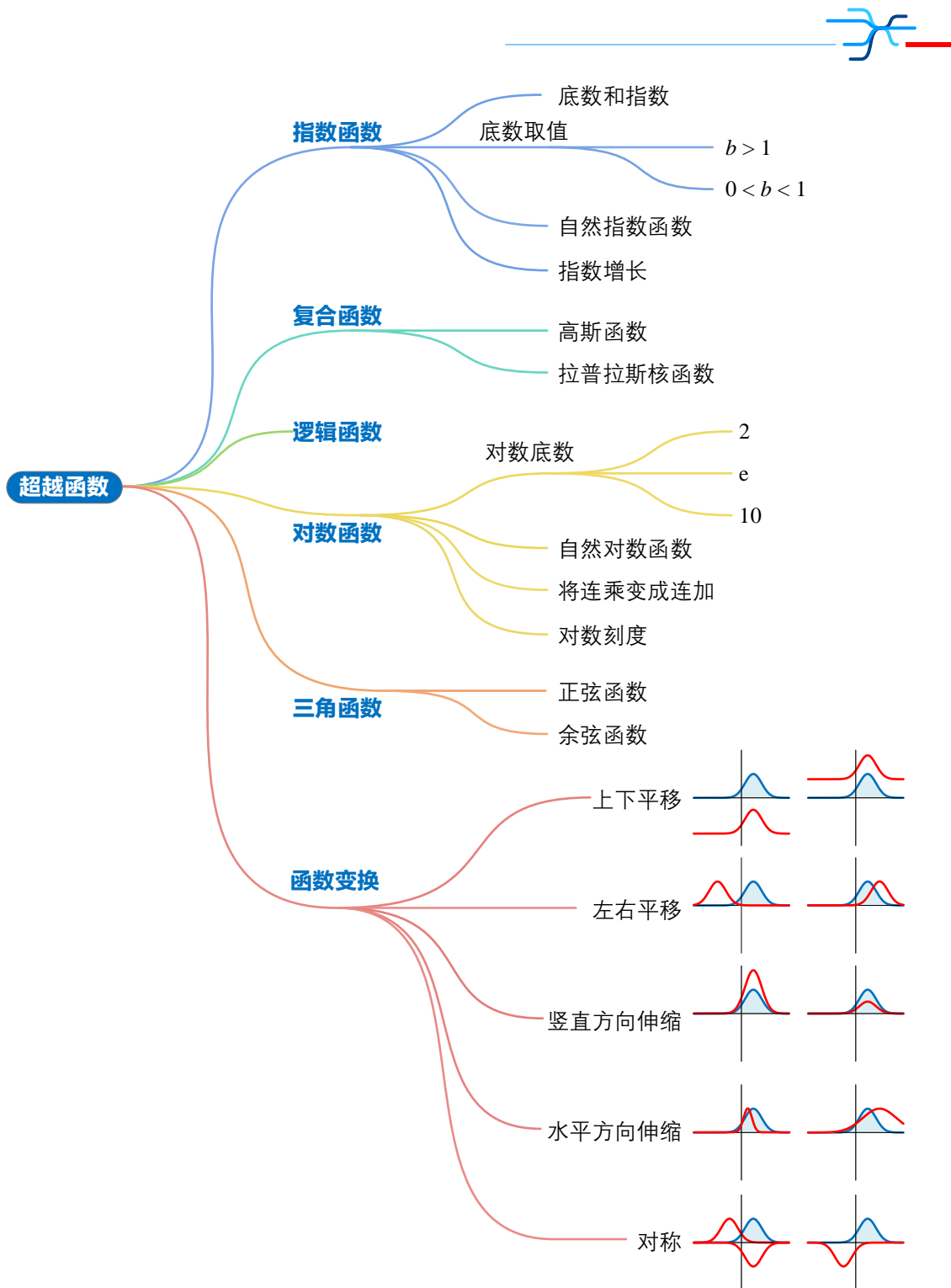
本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com



12.1 指数函数：指数为自变量

指数函数 (exponential function) 的一般形式为：

$$f(x) = b^x \quad (1)$$

其中， b 为底数 (base)，自变量 x 为指数 (exponent)。

▲ 注意，幂函数的自变量为底数，而指数函数的自变量为指数。

图 1 所示为当底数取不同值时指数函数图像，这几条曲线都经过 $(0, 1)$ 。

请大家区分底数 $b > 1$ 和 $0 < b < 1$ 两种情况对应的指数函数图像。 $b > 1$ 时， $f(x) = b^x$ 单调递增； $0 < b < 1$ 时， $f(x) = b^x$ 单调递减。

绘图时，可以用 `numpy.linspace()` 产生 x 数据，然后用 `b**x` 或 `numpy.power(b, x)` 计算指数函数值 b^x 。

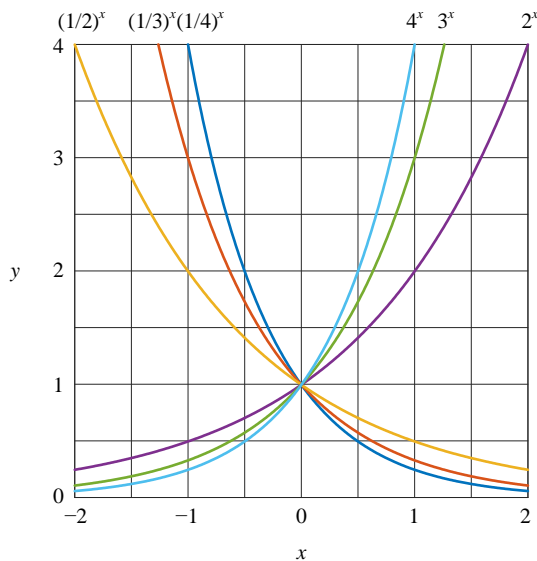


图 1. 不同底数的指数函数

自然指数函数

更多情况，指数函数指的是自然指数函数 (natural exponential function)：

$$f(x) = e^x = \exp(x) \quad (2)$$

自然指数函数中的“自然”指的是自然常数 e 为底数， $e \approx 2.718$ 。

(1) 可以转化成以 e 为底数的函数：

$$y = f(x) = b^x = e^{\ln b \cdot x} = \exp(\ln b \cdot x) \quad (3)$$

表 1. 用英文读指数

数学表达	英文表达
e^x	e raised to the x th power e to the x e to the power of x exponential of x exponential x
$y = e^x$	y equals (is equal to) exponential x
$y = b^x$	y equals (is equal to) b to the x y equals (is equal to) b raised to the power of x
e^{x+y}	e to the quantity x plus y power e raised to the power of x plus y
$e^x + y$	the sum of e to the x and y e to the x power plus y
$e^x e^y$	the product of e to the x power and e to the y power
$e^x \cdot y$	the product of e to the x power and y e raised to the x power times y

指数增长

指数增长 (exponential growth) 模型就是用如下指数函数来表达：

$$G(t) = (1 + r)^t \quad (4)$$

其中， r 为年化增长率， t 是年限。

当增长率 r 取不同值时，指数增长模型 $G(t)$ 和年限对应的关系如图 2 所示。**翻倍时间** (doubling time) 指的是当增长翻倍时所用的时间。图 2 中平行于横轴的虚线就是增长翻倍所对应的高度。

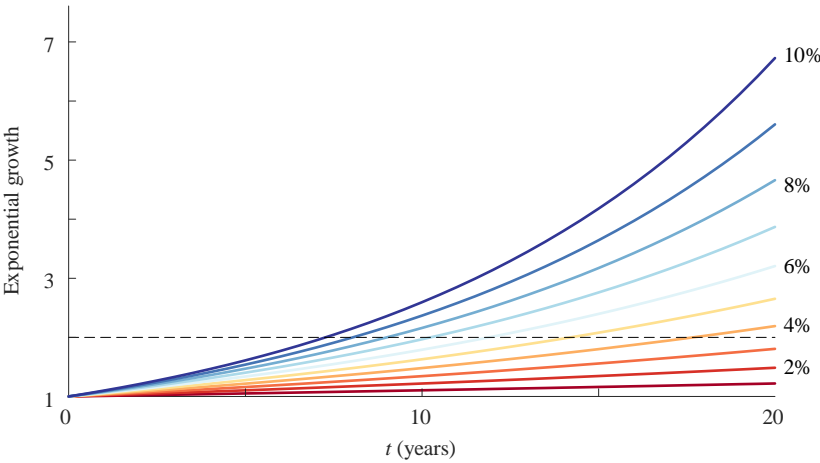


图 2. 指数增长

12.2 对数函数：把连乘变成连加

对数函数 (logarithmic function) 解析式如下：

$$y = f(x) = \log_b(x) \quad (5)$$

其中， b 为**对数底数** (logarithmic base)， $b > 0$ 且 $b \neq 1$ 。上述对数函数的定义域为 $x > 0$ 。

如图 3 所示， $b > 1$ 时， $f(x)$ 在定义域上为单调增函数。 $0 < b < 1$ 时， $f(x)$ 在定义域上为单调减函数。

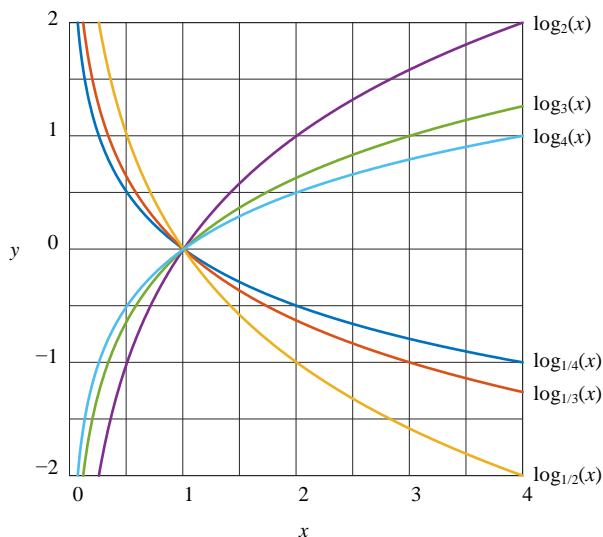


图 3. 不同底数的对数函数

自然对数函数

图 4 中蓝色曲线为**自然对数函数** (natural logarithmic function)，函数如下：

$$y = f(x) = \ln(x) = \log_e(x) \quad (6)$$

如图 4 所示，自然指数函数 (红色) 和自然对数函数 (蓝色) 互为反函数，两条曲线关于图中划线对称。

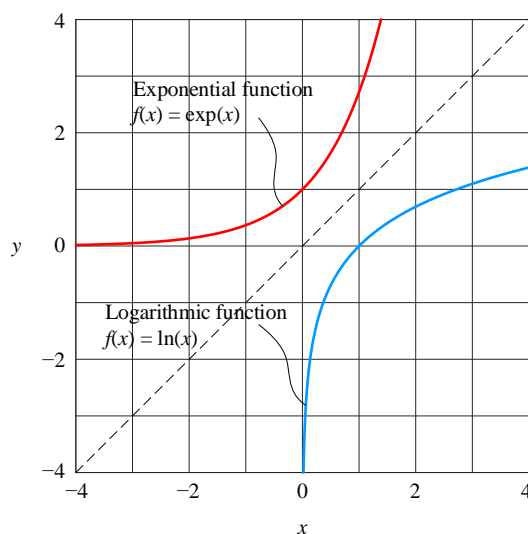


图 4. 自然对数函数和自然指数函数

Numpy 提供三个特殊底数对数函数运算：

- ▶ 底数为 2 对数函数 $\log_2(x)$ ，函数为 `numpy.log2()`；
- ▶ 底数为 e 自然对数函数 $\ln(x)$ ，函数为 `numpy.log()`；
- ▶ 底数为 10 对数函数 $\log_{10}(x)$ ，函数为 `numpy.log10()`。

其他底数对数函数运算可以利用如下公式完成：

$$\log_b x = \frac{\ln(x)}{\ln(b)} \quad (7)$$

对数运算特点

请大家关注以下几个对数运算规则：

$$\begin{aligned} \log_b x &= \frac{\log_k x}{\log_k b} \\ \log_b x &= \frac{\log_{10} x}{\log_{10} b} = \frac{\ln x}{\ln b} \\ \log_{b^n} x^m &= \frac{m}{n} \log_b x \\ x &= b^{\log_b(x)} \\ x^{\log_b(y)} &= y^{\log_b(x)} \end{aligned} \quad (8)$$

对数的一个重要的性质是，把连乘变成连加：

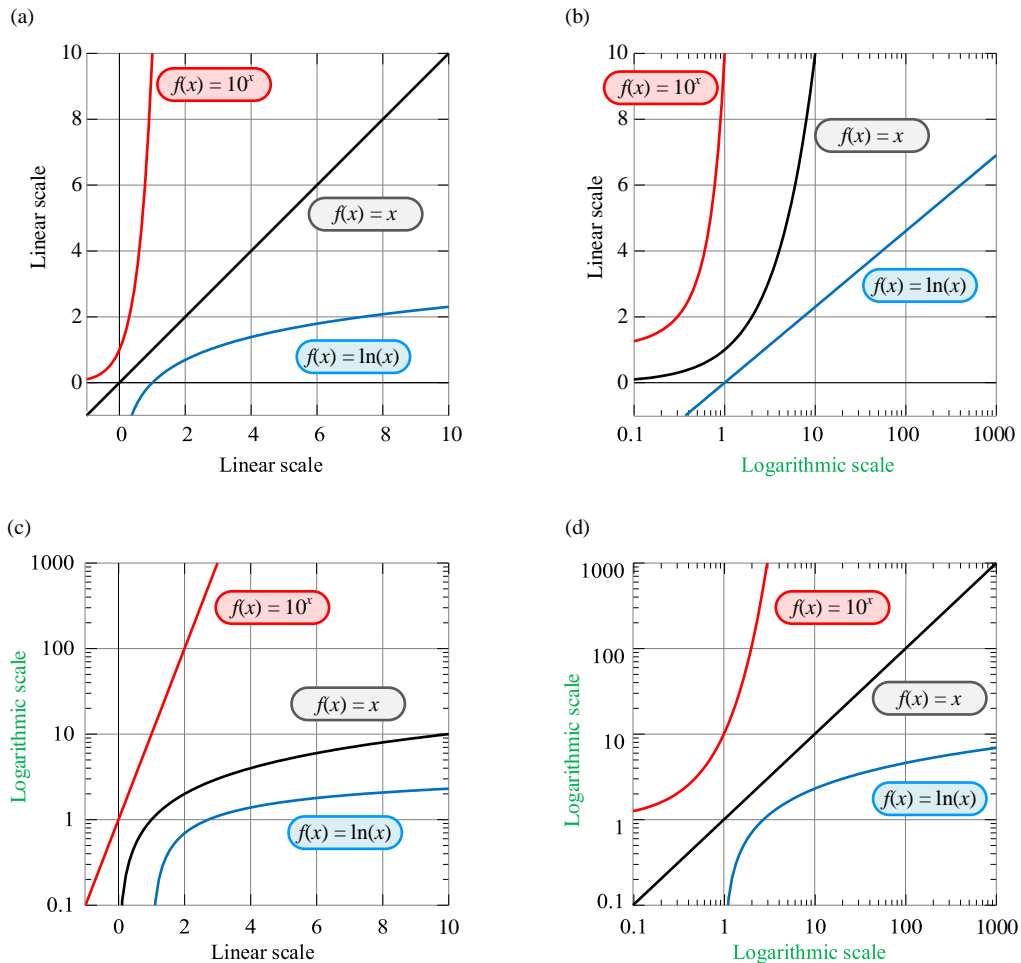
$$\log_b (xyz) = \log_b x + \log_b y + \log_b z \quad (9)$$

我们会考虑用对数运算把连乘变成连加，是因为连乘不容易求偏导，而对连加求偏导则容易很多。特别地，高斯函数存在 $\exp()$ 项， $\ln()$ 可以把指数项变成求和形式。再者 $\ln()$ 不改变单调性。

在概率计算中，概率值累计乘积会出现数值非常小的正数情况，比如 $1e-30$ (10^{-30})。由于计算机的精度是有限的，无法识别这一类数据。而取对数之后，更易于计算机的识别。比如，对 $1e-30$ 以 10 为底取对数后得到 -30。

对数刻度

对数刻度 (logarithmic scale 或 logarithmic axis) 是一种**非线性刻度** (nonlinear scale)，常用来描述较大的数值。图 5 (a) 的横轴和纵轴都是**线性刻度** (linear scale)，图中一元一次函数 $f(x) = x$ 为一条直线。图 5 (b) 的横轴为对数刻度，图中对数函数 $f(x) = \ln(x)$ 为一条直线。图 5 (c) 的纵轴为对数刻度，其中指数函数 $f(x) = 10^x$ 为一条直线。图 5 (d) 中，横轴、纵轴都是对数刻度，图中一元一次函数 $f(x) = x$ 还是一条直线。



本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

图 5. 几种对数刻度

表 2. 用英文读对数

数学表达	英文表达
$\log_4 x$	Logarithm of x with base four
$y = \log_a x$	y is the logarithm of x to the base a . y is equal to log base a of x .
$\ln y$	Log y to the base e Log to the base e of y Natural log (of) y
$\log_2 8 = 3$	The log base 2 of 8 is equal to 3. The logarithm of 8 with base 2 is 3. Log base 2 of 8 is 3.
$\log_4 16 = 2$	The log base 4 of 16 is equal to 2.
$\log_2 \frac{1}{8} = -3$	The log base 2 of 1/8 is equal to -3 .
$\log_6 108 = 3$	The logarithm of 108 to the base 6 is 3 3 is the logarithm of 108 to the base 6.



Bk3_Ch12_01.py 绘制图 5。

12.3 高斯函数：高斯分布之基础

复合函数 (function composition) 通俗地说就是函数套函数，是把几个简单的函数复合得到一个较为复杂的函数。

高斯函数

自然指数函数经常和其他函数构造复合函数。比如，自然指数函数复合二次函数，得到**高斯函数** (Gaussian function)：

$$f(x) = \exp(-\gamma x^2) \tag{10}$$

其中， γ 为参数， $\gamma > 0$ 。高斯函数的定义域是 $(-\infty, +\infty)$ ，而值域是 $(0, 1]$ 。(10) 给出的高斯函数关于 $x = 0$ 对称。

⚠ 注意，高斯函数无限接近 0，却不到达 0。

图 6 (a) 所示为 γ 决定高斯函数的形状。

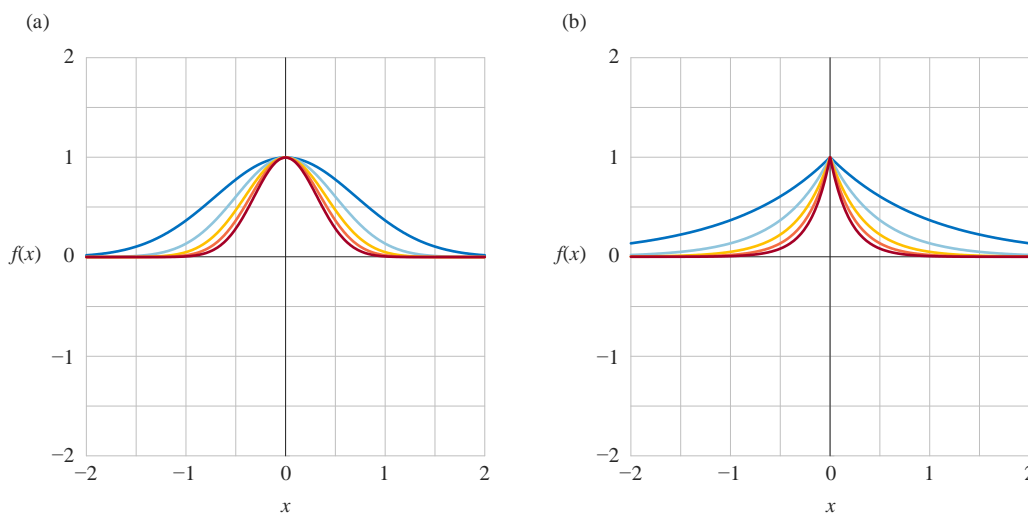


图 6. 高斯函数和拉普拉斯核函数

最基本的高斯函数为：

$$f(x) = \exp(-x^2) \quad (11)$$

如下也是常用的高斯函数的一般形式：

$$f(x) = a \cdot \exp\left(\frac{-(x-b)^2}{2c^2}\right) \quad (12)$$

上述高斯函数关于 $x = b$ 对称。

(11) 通过缩放、平移等变换来可以得到 (12)。函数变换是本章最后要讲解的内容。

高斯函数和**高斯分布** (Gaussian distribution) 的**概率密度函数** (Probability Density Function, PDF) 直接相关。高斯函数可以进一步推广得到**径向基核函数** (radial basis function, RBF)。



下一章将介绍二元高斯函数的性质。此外，鉴于高斯函数的重要性，本书后续导数、积分相关内容都会以高斯函数作为实例。

高斯小传

高斯函数以著名数学家**高斯** (Carl Friedrich Gauss) 命名。

在数据科学和机器学习领域，高斯的名字无处不在，比如大家耳熟能详的高斯核函数、高斯消去、高斯分布、高斯平滑、高斯朴素贝叶斯、高斯判别分析、高斯过程、高斯混合模型等等。并不是高斯发明了这些算法；而是，后来人在创造这些算法时，都用到了高斯分布。

被称作数学王子的高斯，出身贫寒。母亲做过女佣近乎文盲，父亲多半生靠体力讨生活。据说，高斯自幼喜欢读书，特别是和数学相关的书籍；渴望学习、热爱知识是他的驱动力，而不是颜如玉、黄金屋。



卡尔·弗里德里希·高斯 (Carl Friedrich Gauss)

德国数学家、物理学家、天文学家 | 1777 ~ 1855

常被称作“数学王子”，在数学的每个领域开疆拓土。丛书关键词：● 等差数列 ● 高斯分布

● 最小二乘法 ● 高斯朴素贝叶斯 ● 高斯判别分析 ● 高斯过程 ● 高斯混合模型 ● 高斯核函数

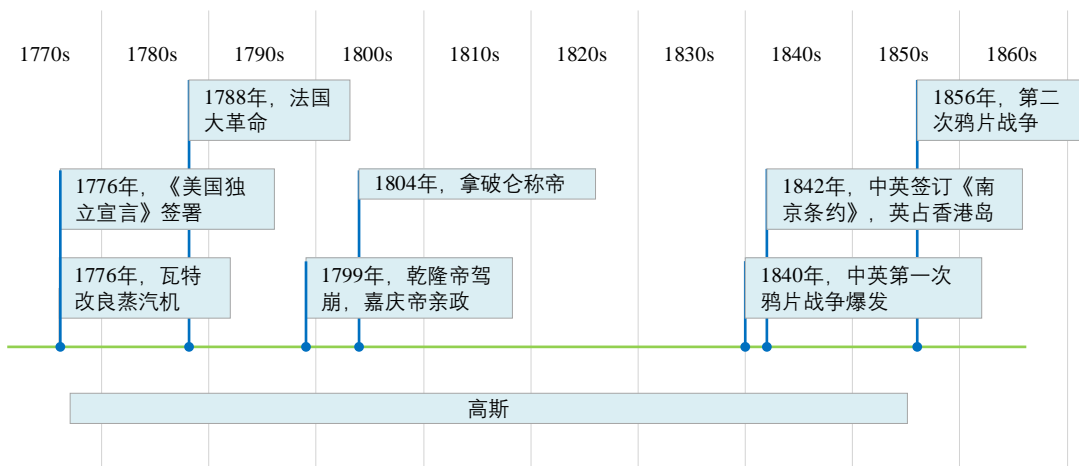


图 7. 高斯所处时代大事记

拉普拉斯核函数

此外，绝对值函数 $|x|$ 和指数函数的复合，得到的是一元**拉普拉斯核函数** (Laplacian kernel function)：

$$f(x) = \exp(-\gamma|x|) \quad (13)$$

图 6 (b) 所示为 γ 决定拉普拉斯核函数的形状。

▲ 注意，图 6 (b) 中拉普拉斯核函数在 $x = 0$ 处有“尖点”，它破坏了函数的平滑。拉普拉斯核函数也经常出现在机器学习一些算法当中。

12.4 逻辑函数：在 0 和 1 之间取值

逻辑函数 (logistic function) 也可以视作是自然指数函数扩展得到的复合函数。下式为最简单的一元逻辑函数：

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} = \frac{\exp(x)}{1 + \exp(x)} \quad (14)$$

更一般的一元逻辑函数形式为：

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-(b_0 + b_1 x))} \quad (15)$$

可以明显发现逻辑函数的取值范围在 0 和 1 之间，函数无限接近 0 和 1，却不能达到。如图 8 所示， b_1 影响图像的陡峭程度，注意图中 $b_0 = 0$ 。

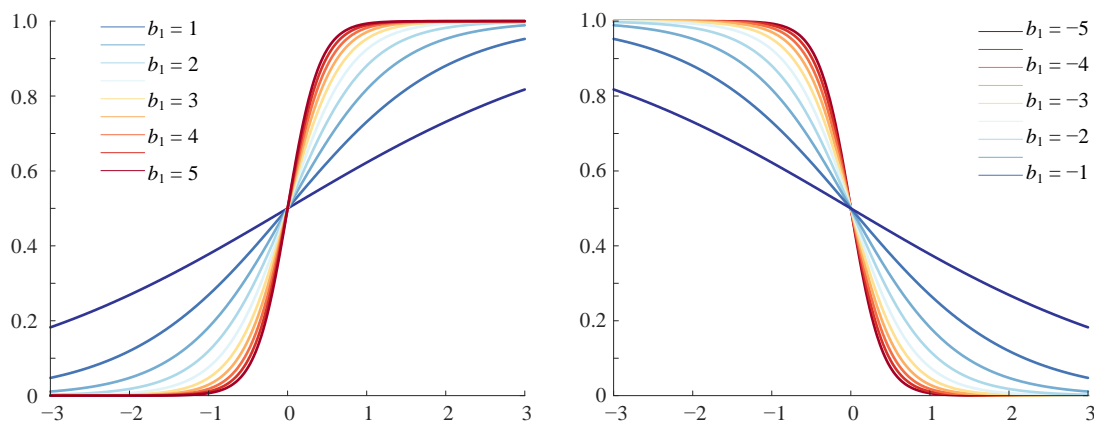


图 8. b_1 影响逻辑函数的陡峭程度

中心点位置

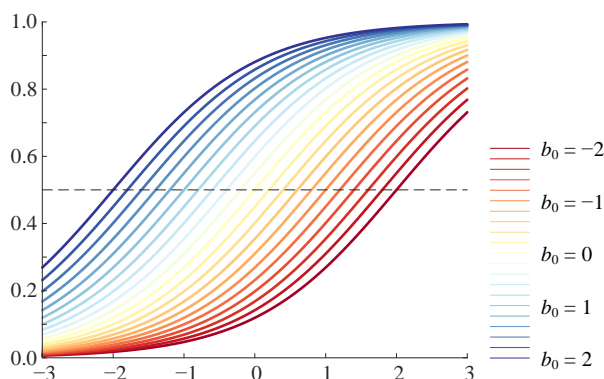
下面确定 $f(x) = 1/2$ 位置，令，

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-(b_0 + b_1 x))} = \frac{1}{2} \quad (16)$$

整理得到：

$$x = -\frac{b_0}{b_1} \quad (17)$$

这个点被称作为逻辑函数中心所在位置。图 9 中 $b_1 = 1$ ， b_0 决定逻辑函数中心所在位置。

图 9. $b_1 = 1$ 时, b_0 决定逻辑函数中心位置

逻辑回归 (logistic regression) 模型基于逻辑函数。逻辑回归虽然被称作回归模型，但是它经常用来做分类，特别是二分类。

上一章我们看到线性回归中输出值 y 是连续值。如图 10 所示，逻辑回归中 y 可以为离散值，比如 0、1。因此，我们也可以把逻辑函数想象成一个开关。此外，逻辑回归可以看做是在线性回归基础上增加了一个非线性映射。

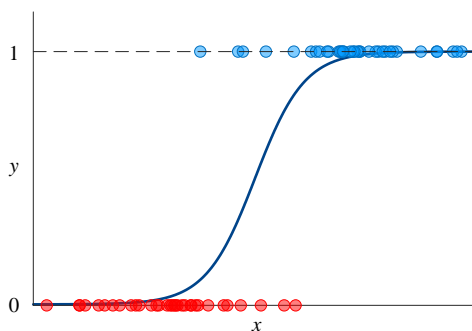


图 10. 逻辑回归可以用来做二分类

逻辑斯谛增长

自然界和人类社会中，指数增长这种 **J 型增长** (J-shaped growth) 一般只在一段时间内存在。各种条件会限制增长幅度，比如人口增长不可能一直按指数增长持续下去，毕竟地球的**承载能力** (carrying capability) 有限。

而逻辑曲线可以用来模拟人口增长的 **S 型增长曲线** (S-shaped growth curve)，如图 11 所示。

S 型增长曲线中，开始阶段类似指数增长。

然后，随着种群个体不断增多，受限于有限资源，个体之间对食物、生存空间等关键资源争夺越来越激烈，增长阻力变得越来越大，增速开始放慢。

最后，增长逐渐停止，趋向于瓶颈。

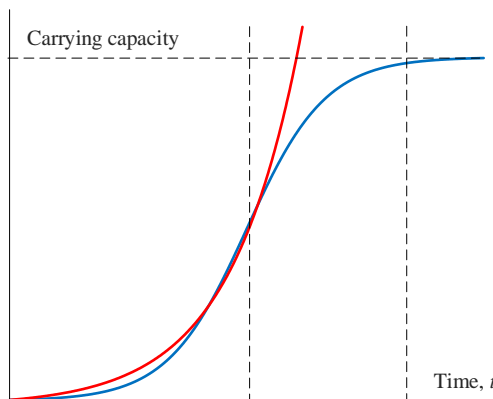


图 11. 逻辑函数模拟人口增长

S 型函数

逻辑函数是 **S 型函数** (sigmoid function 或 S-shaped function) 的一种。S 型函数因其函数图像形状类似字母 S 而得名。机器学习和深度学习，S 型函数经常出现。

常见的 S 型函数还有双曲正切函数 $f(x) = \tanh(x)$ 、反正切函数 $f(x) = \arctan(x)$ 、误差函数 $f(x) = \operatorname{erf}(x)$ 等。



本书会在第 18 章专门介绍误差函数。

一些代数函数也可以归类为 S 型函数，比如：

$$f(x) = \frac{x}{1+|x|}, \quad f(x) = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} \quad (18)$$

图 12 比较几种常用的 S 型函数曲线。请注意，图 12 中反正切函数为 $f(x) = \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\pi}{2}x\right)$ 。计算双曲正切函数用的函数 `numpy.tanh()`。误差函数用的是符号函数 `sympy.erf()`。

双曲正切函数 $f(x) = \tanh(x)$ 和 (14) 逻辑函数的关系为：

$$f(x) = \frac{1}{1+\exp(-x)} = \frac{\exp(x)}{1+\exp(x)} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \tanh\left(\frac{x}{2}\right) \quad (19)$$

图 12 中，除 (19) 以外，函数的取值范围都是 $(-1, 1)$ 。这些函数都无限接近 -1 和 1，但是不能达到。

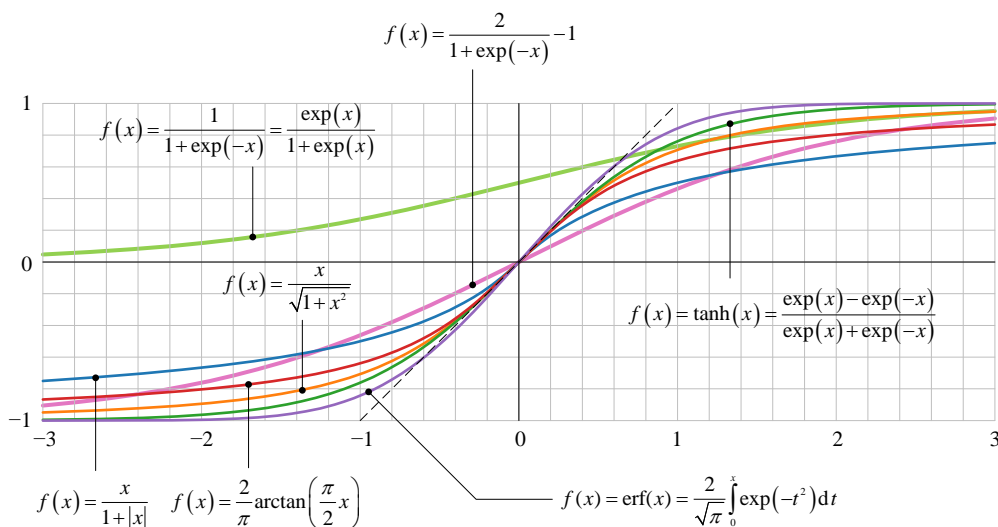


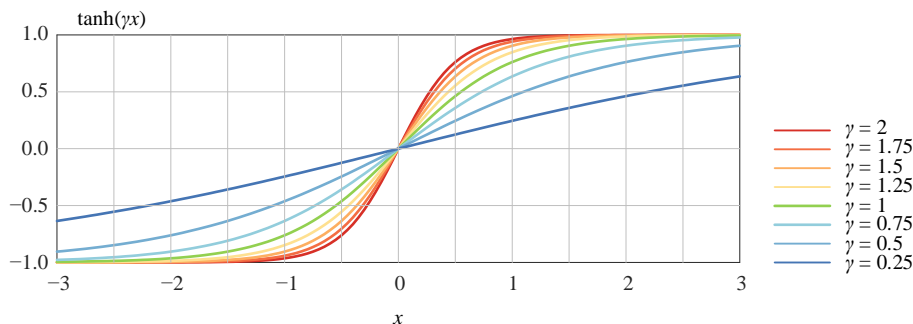
图 12. 比较常用的几种 S 型函数曲线形状

tanh() 函数

在很多机器学习算法中，sigmoid 函数特指 tanh() 函数。给定如下 tanh() 函数一般式：

$$f(x) = \tanh(\gamma x) \quad (20)$$

图 13 所示为 γ 如何影响曲线形状。

图 13. γ 影响双曲正切函数形状

12.5 三角函数：周期函数的代表

本节介绍几个常用的三角函数。**三角函数** (trigonometric function 或 circular function) 是一类**周期函数** (periodic function)。

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

正弦函数

正弦波 (sine wave 或 sinusoid) 是一种常见的波形，比如物理学中的**正弦交流电** (sinusoidal alternating current)。图 14 (a) 所示为如下最基本的**正弦函数** (sine function)：

$$y = f(x) = \sin(x) \quad (21)$$

图 14 (a) 所示正弦函数定义域为整个实数域。 $f(x) = \sin(x)$ 函数是**奇函数** (odd function)，关于原点对称。这个函数的**周期** (period) 是 $T = 2\pi$ ，函数值域是 $[-1, 1]$ 。准确来说，这个周期 T 是最小正周期。

图 14 (a) 所示正弦函数取得极大值 1 对应的 x 为：

$$x = \frac{\pi}{2} + 2\pi n \quad (22)$$

其中， n 为整数。

正弦函数的极小值为 -1 对应 x 为：

$$x = -\frac{\pi}{2} + 2\pi n \quad (23)$$

`numpy.sin()` 函数可以用来完成正弦计算。

余弦函数

图 14 (b) 所示为如下**余弦函数** (cosine function)：

$$y = f(x) = \cos(x) \quad (24)$$

图 14 (b) 所示余弦函数是偶函数，关于纵轴对称； $y = \cos(x)$ 相当于图 14 (a) 正弦函数水平向左移动 $\pi/2$ 。余弦函数也是周期为 2π 的周期函数。`numpy.cos()` 函数可以用来完成余弦计算。

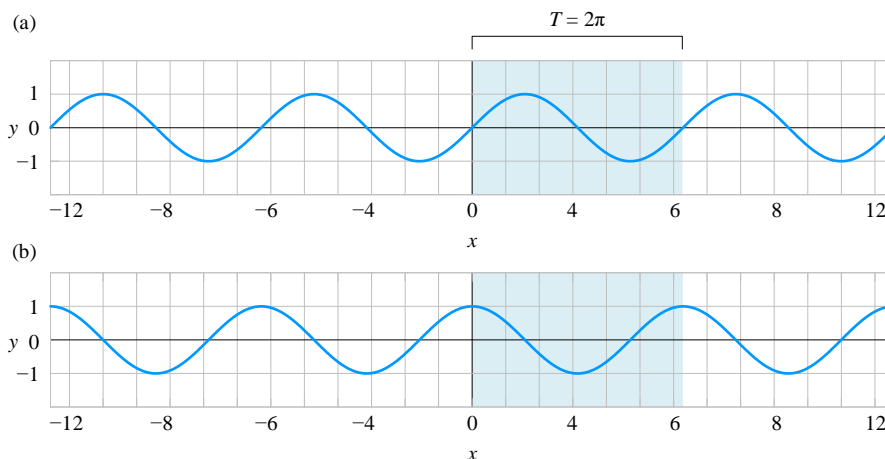
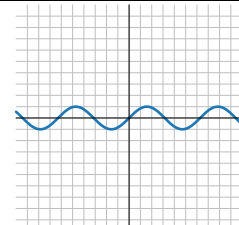
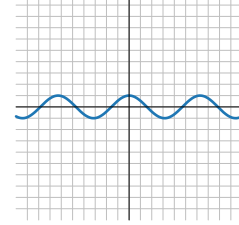
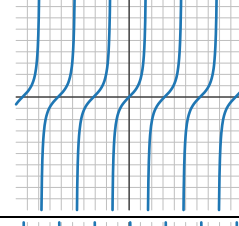
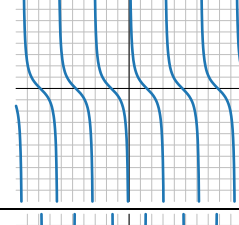
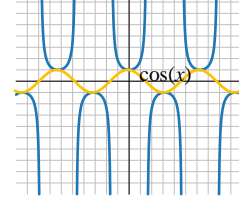


图 14. 正弦函数和余弦函数

表 3 总结了六个常用三角函数图像及性质。

表 3. 六个三角函数的图像和性质

函数	性质	图像
正弦 (sine) $y = \sin(x)$ <code>numpy.sin()</code>	定义域：整个实数集 值域： $[-1, 1]$ 最小正周期： 2π 奇函数，图像关于原点对称 极大值为 1，极小值为 -1	
余弦 (cosine) $y = \cos(x)$ <code>numpy.cos()</code>	定义域：整个实数集 值域： $[-1, 1]$ 最小正周期： 2π 偶函数，图像关于 y 轴对称 极大值为 1，极小值为 -1	
正切 (tangent) $y = \tan(x)$ 也记做 $y = \text{tg}(x)$ <code>numpy.tan()</code>	定义域： $\left\{x \mid x \neq k\pi + \frac{\pi}{2}, k \in \mathbb{Z}\right\}$ 值域：整个实数集 最小正周期： π 奇函数，图像关于原点对称 不存在极值	
余切 (cotangent) $y = \cot(x)$ 也记做 $y = \text{ctg}(x)$ <code>1/numpy.tan()</code>	定义域： $\{x \mid x \neq k\pi, k \in \mathbb{Z}\}$ 值域：整个实数集 最小正周期： π 奇函数，图像关于原点对称 不存在极值	
正割 (secant) $y = \sec(x)$ <code>1/numpy.cos()</code>	定义域： $\left\{x \mid x \neq k\pi + \frac{\pi}{2}, k \in \mathbb{Z}\right\}$ 值域： $ \sec(x) \geq 1$ 最小正周期： 2π 偶函数，图像关于 y 轴对称 不存在极值	

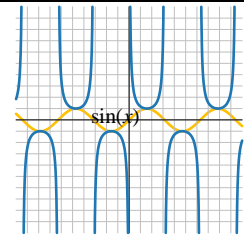
余割 (cosecant) $y = \csc(x)$ <code>1/numpy.sin()</code>	定义域: $\{x x \neq k\pi, k \in \mathbb{Z}\}$ 值域: $ \csc(x) \geq 1$ 最小正周期: 2π 奇函数, 图像关于原点对称 不存在极值	
--	---	--

表 4. 用英文读三角函数

数学表达	英文表达
$\sin \theta + x$	Sine of theta, that quantity plus x .
$\sin(\theta + \omega)$	Sine of sum theta plus omega. Sine of the quantity theta plus omega.
$\sin(\theta) \cdot x$	Sine theta times x .
$\sin(\theta\omega)$	Sine of the product theta time omega.
$(\sin^2) \cdot x$	Sine of theta squared, that quantity times x .
$(\sin^2 \theta) \cdot x$	Sine squared of theta, that quantity times x .

12.6 函数变换：平移、缩放、对称

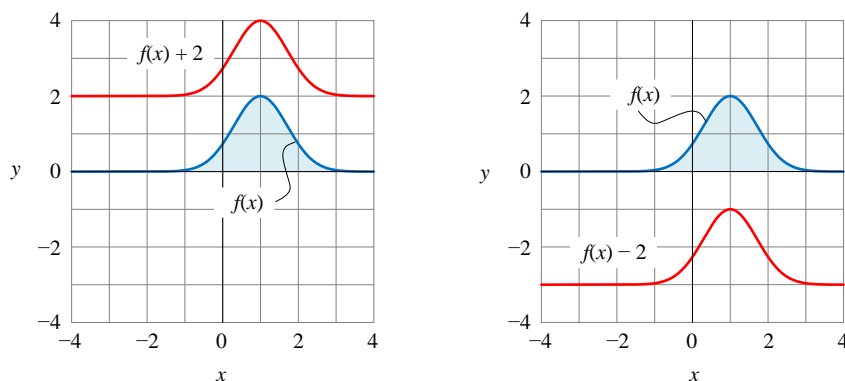
本章最后利用高斯函数和大家探讨函数变换。常见的函数变换有三种：平移、缩放和对称。

给定某个函数 $y = f(x)$ 解析式为：

$$f(x) = 2\exp(-(x-1)^2) \quad (25)$$

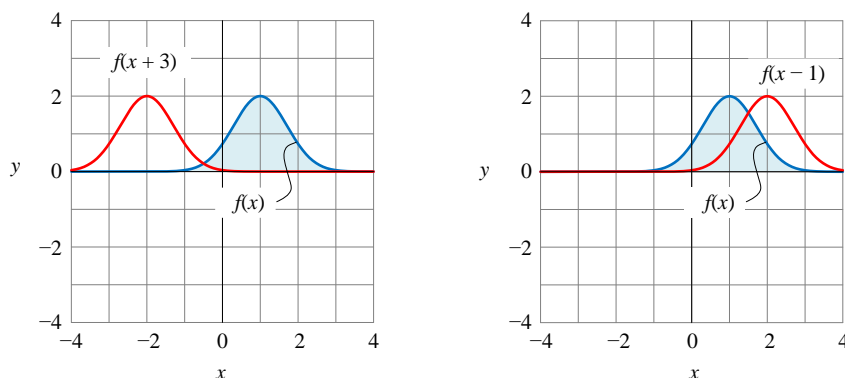
平移

如图 15 所示，相对 $y = f(x)$ ， $f(x) + c$ 竖直向上平移 c 单位 (vertical shift up by c units); $f(x) - c$ 将原函数竖直向下平移 c 单位 (vertical shift down by c units)。

图 15. 原函数 $y = f(x)$ 上下平移

如图 16 所示, 相对 $y = f(x)$, $f(x + c)$ 相当于函数向左平移 c 单位 (horizontal shift left by c units), $c > 0$; $f(x - c)$ 相对原函数向右平移 c 单位 (horizontal shift right by c units).

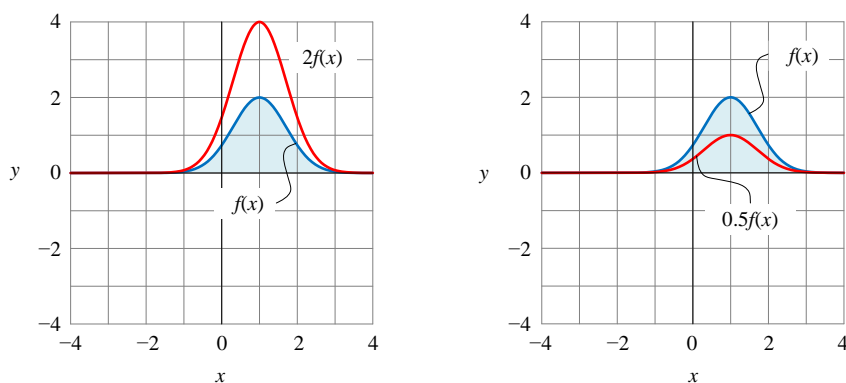
⚠ 注意, 水平平移不影响函数图像和横轴包围的面积。

图 16. 原函数 $y = f(x)$ 左右平移

缩放

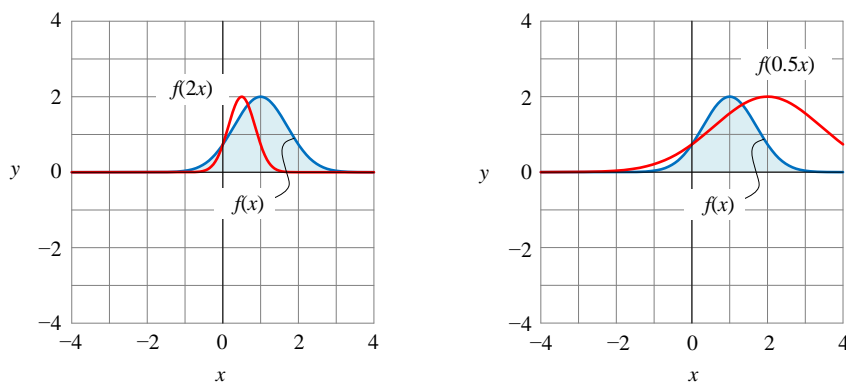
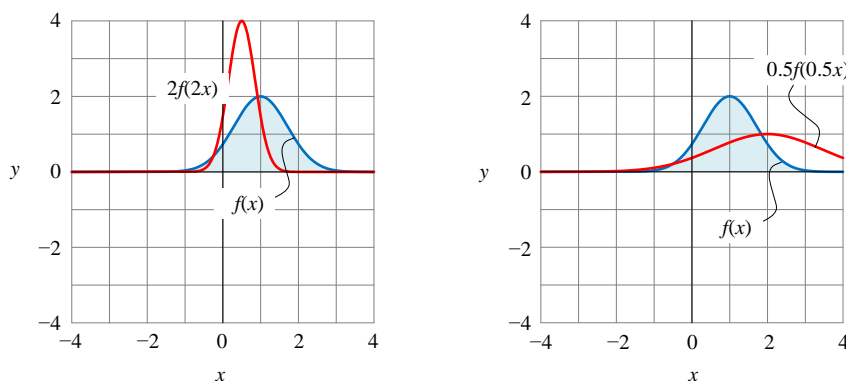
如图 17 所示, 相对 $y = f(x)$, $cf(x)$ 相当于函数**竖直方向缩放** (vertical scaling)。 $c > 1$ 时, $cf(x)$ **竖直方向拉伸** (vertical stretch); $0 < c < 1$ 时, $cf(x)$ **竖直方向压缩** (vertical compression)。

⚠ 注意, 这种几何变换按比例缩放面积。

图 17. 原函数 $y = f(x)$ 竖直方向伸缩

如图 18 所示，相对 $y = f(x)$ ， $f(cx)$ 相当于函数**水平方向伸缩** (horizontal scaling)。 $c > 1$ 时，**水平方向压缩** (horizontal compression)； $0 < c < 1$ 时，**水平方向拉伸** (horizontal stretch)。面积等比例缩放，缩放比例为 $1/c$ 。

如图 19 所示，相对于 $f(x)$ ， $cf(cx)$ 面积不变。

图 18. 原函数 $y = f(x)$ 水平方向伸缩图 19. 原函数 $y = f(x)$ 水平方向、竖直方向同时伸缩

对称

如图 20 所示，相对 $y = f(x)$ ， $f(-x)$ 相当于函数关于 y 轴对称 (reflection about y axis)。 $-f(x)$ 相当于函数关于 x 轴对称 (reflection about x axis)。而 $f(x)$ 和 $-f(-x)$ 关于原点对称。

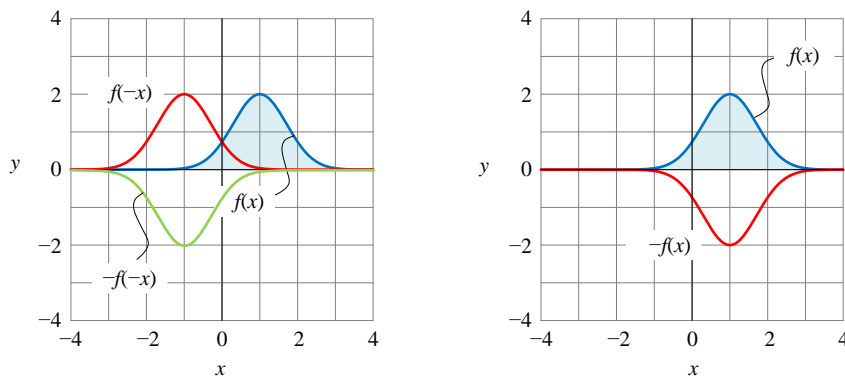


图 20. 原函数 $y = f(x)$ 关于横轴、纵轴对称



一元高斯分布的概率密度函数解析式如下：

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right) \quad (26)$$

其中， μ 为均值， σ 为标准差。

高斯分布的概率密度函数实际上可以通过高斯函数经过函数变换得到。

观察 (26) 中指数部分存在两个函数变换——横轴缩放 (σ)、横轴平移 (μ)。

令，

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma} \quad (27)$$

将 (27) 代入 (26)，整理得到：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}z^2\right) \quad (28)$$

(28) 中分母 $\sigma\sqrt{2\pi}$ ，起到的是纵向缩放作用，保证曲线下方面积为 1。理解这步变换需要积分知识。图 21 所示为以上三步几何变换。

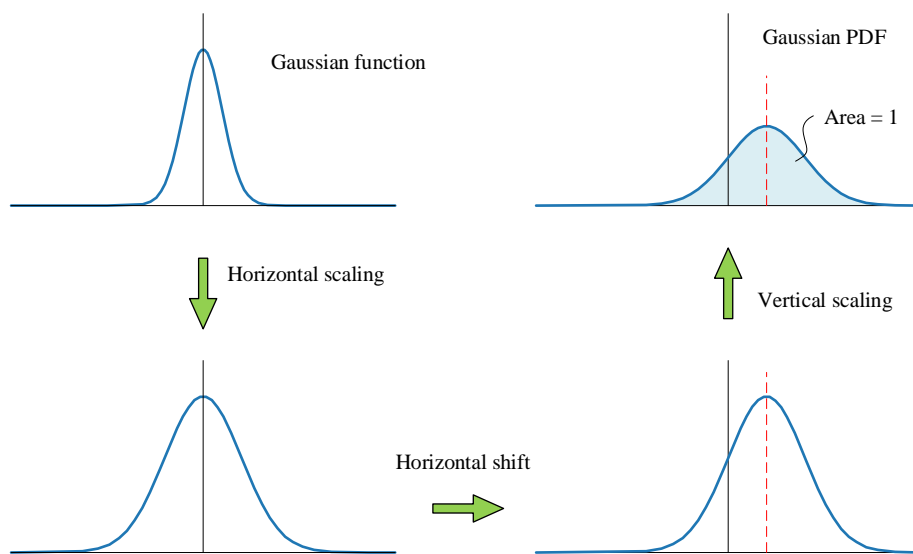


图 21. 高斯函数三步几何变换



Bk3_Ch12_02.py 绘制图 15~图 20。



在 Bk3_Ch12_02.py 基础上，我们做了一个 App 用来交互呈现不同参数对高斯函数的形状和位置影响。请大家参考代码文件 Streamlit_Bk3_Ch12_02.py。



本章有两个要点——函数在数值转化的作用、函数变换。

机器学习各种算法中，函数起到数据转化的作用，比如把取值在正负无穷之间的数值转化在 0 和 1 之间。本系列丛书《数据科学》一册会专门探讨这个话题。

平移、缩放、对称等函数变换是几何变换在函数上的应用。请大家格外注意，函数变换过程前后，形状、单调性、极值点、对称轴、面积等性质的变化。