

第二章 基础知识

修贤超

<https://xianchaoxiu.github.io>

- 2.1 范数
- 2.2 导数
- 2.3 广义实值函数
- 2.4 凸集
- 2.5 凸函数
- 2.6 共轭函数
- 2.7 次梯度

向量范数的定义

■ **定义 2.1** 令记号 $\|\cdot\| : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^+$ 是一种非负函数, 如果满足

□ **正定性** 对于 $\forall v \in \mathbb{R}^n$, 有 $\|v\| \geq 0$, 且 $\|v\| = 0$ 当且仅当 $v = 0_{n \times 1}$

□ **齐次性** 对于 $\forall v \in \mathbb{R}^n$ 和 $\alpha \in \mathbb{R}$, 有 $\|\alpha v\| = |\alpha| \|v\|$

□ **三角不等式** 对于 $\forall v, w \in \mathbb{R}^n$, 均成立 $\|v + w\| \leq \|v\| + \|w\|$

则称 $\|\cdot\|$ 是定义在向量空间 \mathbb{R}^n 上的**向量范数**

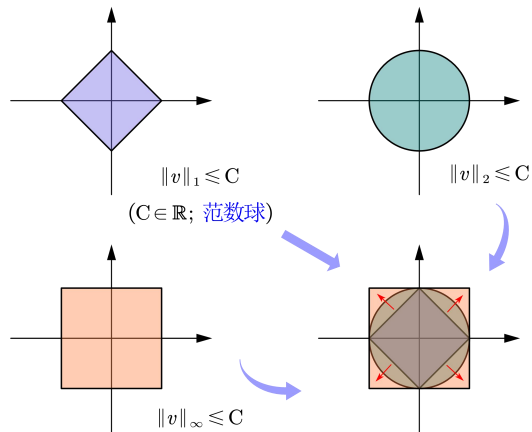
■ 最常用的向量范数

$$\|v\|_p = (|v_1|^p + |v_2|^p + \cdots + |v_n|^p)^{\frac{1}{p}} \quad (p \geq 1)$$

$$\|v\|_\infty = \max_{1 \leq j \leq n} |v_j|$$

向量范数的定义

- 不同范数所度量的距离分别具有怎样的特征呢？



矩阵范数

■ ℓ_1 范数 $\|A\|_1 = \sum_{i,j} |A_{ij}|$

■ Frobenius 范数 $\|A\|_F = \sqrt{\sum_{i,j} A_{ij}^2} = \sqrt{\text{Tr}(AA^\top)}$

■ 算子范数是一类特殊的矩阵范数, 由向量范数诱导得到

$$\|A\|_{(m,n)} = \max_{x \in \mathbb{R}^n, \|x\|_{(n)}=1} \|Ax\|_{(m)}$$

□ $p = 1$ 时, $\|A\|_{p=1} = \max_{\|x\|_1=1} \|Ax\|_1 = \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^m |a_{ij}|$

□ $p = 2$ 时, $\|A\|_{p=2} = \max_{\|x\|_2=1} \|Ax\|_2 = \sqrt{\lambda_{\max}(A^\top A)}$, 又称为 A 的谱范数

□ $p = \infty$ 时, $\|A\|_{p=\infty} = \max_{\|x\|_\infty=1} \|Ax\|_\infty = \max_{1 \leq i \leq m} \sum_{j=1}^n |a_{ij}|$

矩阵范数

■ 核范数

$$\|A\|_* = \sum_{i=1}^r \sigma_i$$

■ 矩阵内积

$$\langle A, B \rangle = \text{Tr}(AB^\top) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n a_{ij} b_{ij}$$

■ 命题 2.2 设 $A, B \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 则

$$|\langle A, B \rangle| \leq \|A\|_F \|B\|_F$$

等号成立当且仅当 A 和 B 线性相关, 即柯西不等式

■ 性质 同一矩阵空间内, 矩阵范数彼此之间是相互等价的

- 2.1 范数
- 2.2 导数
- 2.3 广义实值函数
- 2.4 凸集
- 2.5 凸函数
- 2.6 共轭函数
- 2.7 次梯度

- **定义 2.2** 给定函数 $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, 且 f 在点 x 的一个邻域内有意义, 若存在向量 $g \in \mathbb{R}^n$ 满足

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{f(x+p) - f(x) - \langle g, p \rangle}{\|p\|} = 0$$

其中 $\|\cdot\|$ 是任意的向量范数, 称 f 在点 x 处**可微** (或 **Fréchet 可微**), g 为 f 在点 x 处的**梯度**, 记作

$$\nabla f(x) = \left[\frac{\partial f(x)}{\partial x_1}, \frac{\partial f(x)}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f(x)}{\partial x_n} \right]^\top$$

- 如果对区域 D 上的每一个点 x 都有 $\nabla f(x)$ 存在, 则称 f 在 D 上可微

海瑟矩阵

- **定义 2.3** 如果函数 $f(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 在点 x 处的二阶偏导数 $\frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_i \partial x_j}$ 都存在, 则 f 在点 x 处的**海瑟矩阵**为

$$\nabla^2 f(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1^2} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1 \partial x_2} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1 \partial x_3} & \cdots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2^2} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2 \partial x_3} & \cdots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n \partial x_2} & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n \partial x_3} & \cdots & \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x_n^2} \end{bmatrix}$$

- 当 $\nabla^2 f(x)$ 在区域 D 上的每个点 x 处都存在时, 称 f 在 D 上**二阶可微**
- 若 $\nabla^2 f(x)$ 在 D 上还连续, 则称 f 在 D 上**二阶连续可微**

梯度利普希茨连续

- **定义 2.4** 给定可微函数 f , 若存在 $L > 0$, 对任意的 $x, y \in \text{dom } f$ 有

$$\|\nabla f(x) - \nabla f(y)\| \leq L\|x - y\|$$

则称 f 是**梯度利普希茨连续的**, 相应利普希茨常数为 L

- **引理 2.1** 设可微函数 $f(x)$ 的定义域为 \mathbb{R}^n 且为梯度 L -利普希茨连续的, 则函数 $f(x)$ 有**二次上界**

$$f(y) \leq f(x) + \nabla f(x)^\top (y - x) + \frac{L}{2} \|y - x\|^2, \quad \forall x, y \in \text{dom } f$$

- $f(x)$ 定义域的要求可减弱为凸集

梯度利普希茨连续

- **推论 2.1** 设可微函数 $f(x)$ 的定义域为 \mathbb{R}^n 且存在一个全局极小点 x^* , 若 $f(x)$ 为梯度 L -利普希茨连续的, 则对任意的 x 有

$$\frac{1}{2L} \|\nabla f(x)\|^2 \leq f(x) - f(x^*)$$

证明 由于 x^* 是全局极小点, 有

$$f(x^*) \leq f(y) \leq f(x) + \nabla f(x)^\top (y - x) + \frac{L}{2} \|y - x\|^2$$

上式对任意的 y 均成立, 因此可对不等号右边取下确界

$$\begin{aligned} f(x^*) &\leq \inf_{y \in \mathbb{R}^n} \{f(x) + \nabla f(x)^\top (y - x) + \frac{L}{2} \|y - x\|^2\} \\ &= f(x) - \frac{1}{2L} \|\nabla f(x)\|^2 \end{aligned}$$

矩阵变量函数的导数

- 对于函数 $f(X)$, 若存在矩阵 $G \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 满足

$$\lim_{V \rightarrow 0} \frac{f(X + V) - f(X) - \langle G, V \rangle}{\|V\|} = 0$$

其中 $\|\cdot\|$ 是任意矩阵范数, 称矩阵变量函数 f 在 X 处 **Fréchet 可微**, G 为 f 在 Fréchet 可微意义下的梯度, 记为

$$\nabla f(X) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_{11}} & \frac{\partial f}{\partial x_{12}} & \cdots & \frac{\partial f}{\partial x_{1n}} \\ \frac{\partial f}{\partial x_{21}} & \frac{\partial f}{\partial x_{22}} & \cdots & \frac{\partial f}{\partial x_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_{m1}} & \frac{\partial f}{\partial x_{m2}} & \cdots & \frac{\partial f}{\partial x_{mn}} \end{bmatrix}$$

矩阵变量函数的导数

- **定义 2.5** 如果对任意方向 $V \in \mathbb{R}^{m \times n}$, 存在矩阵 $G \in \mathbb{R}^{m \times n}$ 满足

$$\lim_{V \rightarrow 0} \frac{f(X + V) - f(X) - \langle G, V \rangle}{\|V\|} = 0$$

\Downarrow

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(X + tV) - f(X) - t\langle G, V \rangle}{t} = 0$$

则称 f 关于 X **Gâteaux 可微**, G 为 f 在 X 处 Gâteaux 可微意义下的梯度

- 当 f 是 Fréchet 可微函数时, f 也是 Gâteaux 可微的, 且梯度相等

例 2.1

- 线性函数 $f(X) = \text{Tr}(AX^\top B)$

$$\begin{aligned}\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(X + tV) - f(X)}{t} &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\text{Tr}(A(X + tV)^\top B) - \text{Tr}(AX^\top B)}{t} \\ &= \text{Tr}(AV^\top B) = \langle BA, V \rangle\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \nabla f(X) = BA$$

- 二次函数 $f(X, Y) = \|XY - A\|_F^2$

$$\begin{aligned}f(X, Y + tV) - f(X, Y) &= \|X(Y + tV) - A\|_F^2 - \|XY - A\|_F^2 \\ &= 2\langle tXV, XY - A \rangle + t^2\|XV\|_F^2 \\ &= 2t\langle V, X^\top(XY - A) \rangle + \mathcal{O}(t^2)\end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial f}{\partial Y} = 2X^\top(XY - A)$$

The Matrix Cookbook

[<http://matrixcookbook.com>]

Kaare Brandt Petersen
Michael Syskind Pedersen

VERSION: NOVEMBER 15, 2012

2.5.2 Second Order

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}} \text{Tr}(\mathbf{X}^2) = 2\mathbf{X}^T \quad (106)$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}} \text{Tr}(\mathbf{X}^2 \mathbf{B}) = (\mathbf{X}\mathbf{B} + \mathbf{B}\mathbf{X})^T \quad (107)$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}} \text{Tr}(\mathbf{X}^T \mathbf{B} \mathbf{X}) = \mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{B}^T \mathbf{X} \quad (108)$$

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{X}} \text{Tr}(\mathbf{B} \mathbf{X} \mathbf{X}^T) = \mathbf{B}\mathbf{X} + \mathbf{B}^T \mathbf{X} \quad (109)$$

- 2.1 范数
- 2.2 导数
- 2.3 广义实值函数
- 2.4 凸集
- 2.5 凸函数
- 2.6 共轭函数
- 2.7 次梯度

广义实值函数

- 在最优化领域，经常涉及量取 \inf (\sup) 操作，可能为无穷
- **定义 2.6** 令 $\overline{\mathbb{R}} := \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ 为广义实数空间，则映射

$$f: \mathbb{R}^n \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$$

称为**广义实值函数**

- 规定
 - $-\infty < \alpha < \infty, \forall \alpha \in \mathbb{R}$
 - $(+\infty) + (+\infty) = +\infty, \quad (+\infty) + \alpha = +\infty, \forall \alpha \in \mathbb{R}$

适当函数

- **定义 2.7** 给定广义实值函数 f 和非空集合 \mathcal{X} , 如果存在 $x \in \mathcal{X}$ 使得 $f(x) < +\infty$, 并且对任意的 $x \in \mathcal{X}$ 都有 $f(x) > -\infty$, 则称函数 f 是关于集合 \mathcal{X} 的**适当函数**
- 具体含义
 - 至少有一处取值不为正无穷
 - 处处取值不为负无穷
- 对于适当函数 f , 规定其定义域

$$\text{dom } f = \{x \mid f(x) < +\infty\}$$

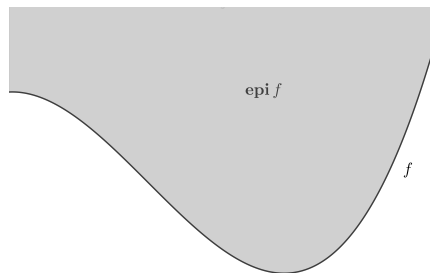
- 若无特殊说明, 定理中所讨论的函数均为适当函数

- **定义 2.8** 设 f 为广义实值函数, α -下水平集定义为

$$C_\alpha = \{x \mid f(x) \leq \alpha\}$$

- **定义 2.9** 设 f 为广义实值函数, **上方图**定义为

$$\text{epi } f = \{(x, t) \in \mathbb{R}^{n+1} \mid f(x) \leq t\}$$



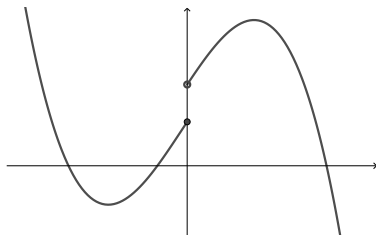
下半连续函数

■ **定义 2.10** 设 f 为广义实值函数, 若 $\text{epi } f$ 为闭集, 则称 f 为**闭函数**

■ **定义 2.11** 设 f 为广义实值函数, 若对任意的 $x \in \mathbb{R}^n$, 有

$$\liminf_{y \rightarrow x} f(y) \geq f(x)$$

则 $f(x)$ 为**下半连续函数**



闭函数与下半连续函数

■ **定理 2.2** 设广义实值函数 $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$, 则以下命题等价

- $f(x)$ 的任意 α -下水平集都是闭集
- $f(x)$ 是下半连续的
- $f(x)$ 是闭函数

■ **性质**

- 若 f 与 g 均为适当的闭（下半连续）函数, 并且 $\text{dom } f \cap \text{dom } g \neq \emptyset$, 则 $f + g$ 也是闭（下半连续）函数
- 若 f 为闭（下半连续）函数, 则 $f(Ax + b)$ 也为闭（下半连续）函数

- 2.1 范数
- 2.2 导数
- 2.3 广义实值函数
- 2.4 凸集
- 2.5 凸函数
- 2.6 共轭函数
- 2.7 次梯度

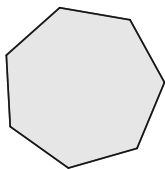
凸集的几何定义

- **定义 2.12** 若过集合 C 中的任意两点的直线都在 C 内, 则称 C 为**仿射集**, 即

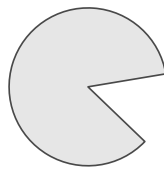
$$x_1, x_2 \in C \Rightarrow \theta x_1 + (1 - \theta)x_2 \in C, \forall \theta \in \mathbb{R}$$

- **定义 2.13** 若连接集合 C 中的任意两点的线段都在 C 内, 则称 C 为**凸集**, 即

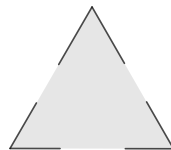
$$x_1, x_2 \in C \Rightarrow \theta x_1 + (1 - \theta)x_2 \in C, \forall 0 \leq \theta \leq 1$$



(a)



(b)



(c)

凸集的性质

- 若 \mathcal{S} 是凸集, 则 $k\mathcal{S} = \{ks \mid k \in \mathbb{R}, s \in \mathcal{S}\}$ 是凸集
- 若 \mathcal{S} 和 \mathcal{T} 均是凸集, 则 $\mathcal{S} + \mathcal{T} = \{s + t \mid s \in \mathcal{S}, t \in \mathcal{T}\}$ 是凸集
- 若 \mathcal{S} 和 \mathcal{T} 均是凸集, 则 $\mathcal{S} \cap \mathcal{T}$ 是凸集

证明 设 $x, y \in \mathcal{S} \cap \mathcal{T}$ 且 $\theta \in [0, 1]$. 由于 \mathcal{S} 和 \mathcal{T} 均为凸集, 则

$$\theta x + (1 - \theta)y \in \mathcal{S} \cap \mathcal{T}$$

- 凸集的内部和闭包都是凸集
- 任意多凸集的交都是凸集

凸组合和凸包

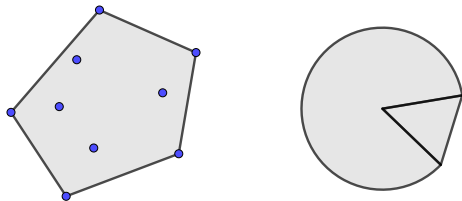
■ 形如

$$x = \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \cdots + \theta_k x_k$$

$$\theta_1 + \cdots + \theta_k = 1, \theta_i \geq 0, i = 1, \cdots, k$$

的点称为 x_1, \cdots, x_k 的凸组合

■ 集合 S 的所有点的凸组合构成的点集为 S 的凸包, 记为 $\text{conv } S$



■ $\text{conv } S$ 是包含 S 的最小凸集

仿射组合和仿射包

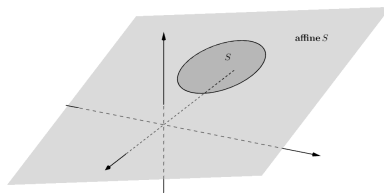
■ 定义 2.14 形如

$$x = \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \cdots + \theta_k x_k$$

$$\theta_1 + \cdots + \theta_k = 1, \theta_i \in \mathbb{R}, i = 1, \cdots, k$$

的点称为 x_1, \cdots, x_k 的**仿射组合**

■ 集合 S 的所有点的仿射组合构成的点集为 S 的**仿射包**, 记为 $\text{affine } S$



■ $\text{affine } S$ 是包含 S 的最小仿射集

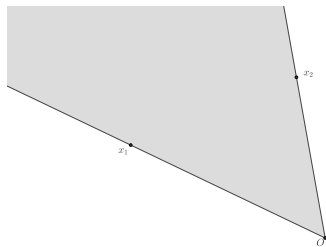
锥组合和凸锥

- 形如

$$x = \theta_1 x_1 + \cdots + \theta_k x_k, \theta_i > 0, i = 1, \cdots, k$$

的点称为 x_1, \cdots, x_k 的**锥组合**

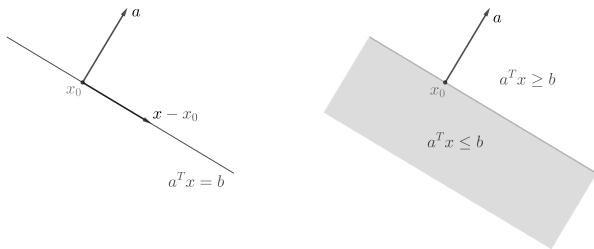
- 若集合 S 中任意点的锥组合都在 S 中, 则称 S 为**凸锥**



- 锥组合不要求系数的和为 1

超平面和半空间

- 任取非零向量 $a \in \mathbb{R}^n$, 称 $\{x \mid a^\top x = b\}$ 为**超平面**, $\{x \mid a^\top x \leq b\}$ 为**半空间**
- 满足线性等式和不等式组点的集合 $\{x \mid Ax \leq b, Cx = d\}$ 称为**多面体**



- 超平面是仿射集和凸集, 半空间是凸集但不是仿射集
- 多面体是有限个半空间和超平面的交

分离超平面定理

- **定理 2.3** 如果 \mathcal{C} 和 \mathcal{D} 是不相交的凸集, 则存在非零向量 a 和常数 b , 使得

$$a^\top x \leq b, \forall x \in \mathcal{C} \quad \text{且} \quad a^\top x \geq b, \forall x \in \mathcal{D}$$

即超平面 $\{x \mid a^\top x = b\}$ 分离了 \mathcal{C} 和 \mathcal{D}

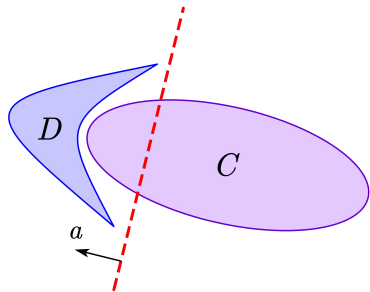
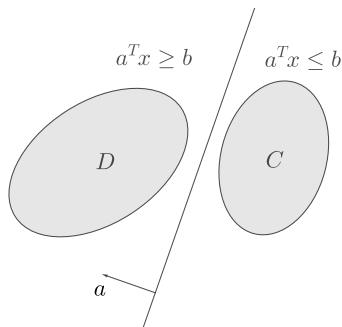
- **定理 2.4** 如果存在非零向量 a 和常数 b , 使得

$$a^\top x < b, \forall x \in \mathcal{C} \quad \text{且} \quad a^\top x > b, \forall x \in \mathcal{D}$$

即超平面 $\{x \mid a^\top x = b\}$ **严格**分离了 \mathcal{C} 和 \mathcal{D}

分离超平面的示意

- 在 \mathbb{R}^2 中的 2 个凸集使用超平面即可轻松划分, 但遇到非凸集合就必须使用更加复杂的平面



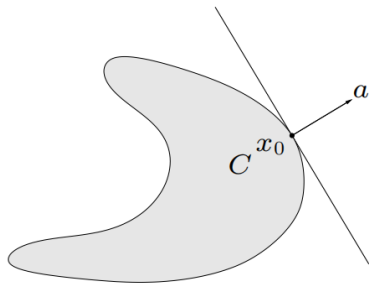
支撑超平面

- **定义 2.5** 给定集合 C 及其边界点 x_0 , 如果 $a \neq 0$ 满足 $a^\top x \leq a^\top x_0, \forall x \in C$, 则称集合

$$\{x \mid a^\top x = a^\top x_0\}$$

为 C 在边界点 x_0 处的**支撑超平面**

- **定理 2.5** 若 C 是凸集, 则 C 的任意边界点处都存在支撑超平面



球和椭球

- 称空间中到点 x_c 的距离小于等于定值 r 的集合为(欧几里得) 球, 即

$$B(x_c, r) = \{x \mid \|x - x_c\|_2 \leq r\} = \{x_c + ru \mid \|u\|_2 \leq 1\}$$

- 设形如

$$\{x \mid (x - x_c)^\top P^{-1}(x - x_c) \leq 1\} = \{x_c + Au \mid \|u\|_2 \leq 1\}$$

的集合为椭球, 其中 x_c 为椭球中心, P 为对称正定, 且 A 非奇异

- 令 $\|\cdot\|$ 是任意一个范数, 称

$$\{x \mid \|x - x_c\| \leq r\}$$

为中心为 x_c 半径为 r 的范数球

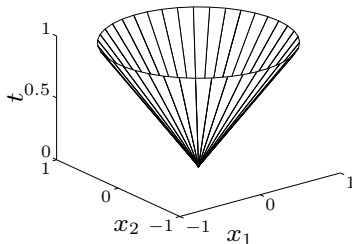
范数锥

- 形如

$$\{(x, t) \mid \|x\| \leq t\}$$

的集合为范数锥

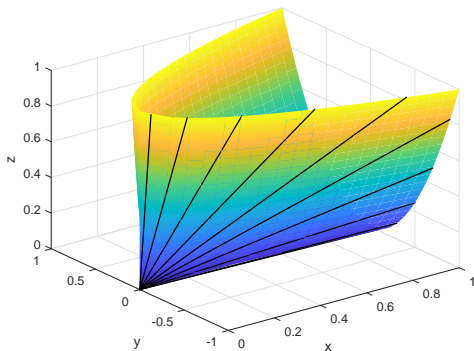
- 使用 $\|\cdot\|_2$ 度量距离的锥为二次锥，也称冰淇淋锥



- 范数球和范数锥都是凸集

(半) 正定锥

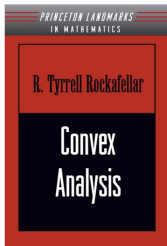
- 记 \mathcal{S}^n 为**对称矩阵**的集合, 即 $\mathcal{S}^n = \{X \in \mathbb{R}^{n \times n} \mid X^\top = X\}$
- 记 \mathcal{S}_+^n 为**半正定矩阵**的集合, 即 $\mathcal{S}_+^n = \{X \in \mathcal{S}^n \mid X \succeq 0\}$
- 记 \mathcal{S}_{++}^n 为**正定矩阵**的集合, 即 $\mathcal{S}_{++}^n = \{X \in \mathcal{S}^n \mid X \succ 0\}$



对于矩阵 $\begin{pmatrix} x & y \\ y & z \end{pmatrix}$, 其特征值应全部大于等于 0

⇓

$$\{(x, y, z) \mid x \geq 0, z \geq 0, xz \geq y^2\}$$



R T Rockafellar

Professor of Mathematics, [University of Washington](#)
Verified email at uw.edu - [Homepage](#)



[optimization](#) [convex analysis](#) [variational analysis](#) [economic equilibrium](#) [risk and reliability](#)

TITLE	CITED BY	YEAR
Solving problems in convex optimal control by progressive decoupling in the dynamics RT Rockafellar Mathematical Control and Related Fields, 0-0		2024
Primal–Dual Stability in Local Optimality M Benko, RT Rockafellar Journal of Optimization Theory and Applications, 1-30	2	2024
Generalized Nash Equilibrium from a Robustness Perspective in Variational Analysis RT Rockafellar Set-Valued and Variational Analysis 32 (2), 19	1	2024
Distributional robustness, stochastic divergences, and the quadrangle of risk RT Rockafellar Computational Management Science 21 (1), 34	2	2024
Data poisoning attacks on traffic state estimation and prediction F Wang, X Wang, Y Hong, RT Rockafellar, XJ Ban Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 104577	1	2024
Generalizations of the proximal method of multipliers in convex optimization RT Rockafellar Computational Optimization and Applications 87 (1), 219-247	6	2024

- 2.1 范数
- 2.2 导数
- 2.3 广义实值函数
- 2.4 凸集
- 2.5 凸函数
- 2.6 共轭函数
- 2.7 次梯度

凸函数的定义

- **定义 2.16** 设 $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 为适当函数, 如果 $\text{dom } f$ 是凸集, 且

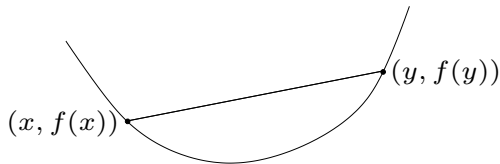
$$f(\theta x + (1 - \theta)y) \leq \theta f(x) + (1 - \theta)f(y)$$

对所有 $x, y \in \text{dom } f$, $0 \leq \theta \leq 1$ 都成立, 则称 f 是**凸函数**

- 若对所有 $x, y \in \text{dom } f$, $x \neq y$, $0 < \theta < 1$, 有

$$f(\theta x + (1 - \theta)y) < \theta f(x) + (1 - \theta)f(y)$$

则称 f 是**严格凸函数**



一元凸函数的例子

- **仿射函数** 对任意 $a, b \in \mathbb{R}$, $ax + b$ 是 \mathbb{R} 上的凸 (凹) 函数
- **指数函数** 对任意 $a \in \mathbb{R}$, e^{ax} 是 \mathbb{R} 上的凸函数
- **绝对值的幂** 对 $p \geq 1$, $|x|^p$ 是 \mathbb{R} 上的凸函数
- **幂函数** 对 $\alpha \geq 1$ 或 $\alpha \leq 0$, x^α 是 \mathbb{R}_{++} 上的凸函数
- **幂函数** 对 $0 \leq \alpha \leq 1$, x^α 是 \mathbb{R}_{++} 上的凹函数
- **对数函数** $\log x$ 是 \mathbb{R}_{++} 上的凹函数
- **Sigmoid 函数、Heaviside 函数、ReLU 函数 ...**

多元凸函数的例子

- 所有的仿射函数既是凸函数，又是凹函数

$$f(x) = a^\top x + b$$

$$f(X) = \text{Tr}(A^\top X) + b = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij} X_{ij} + b$$

- 所有的范数都是凸函数

$$f(x) = \|x\|_p = \left(\sum_{i=1}^n |x_i|^p \right)^{1/p} \quad (p \geq 1)$$

$$f(X) = \|X\|_2 = \sigma_{\max}(X) = (\lambda_{\max}(X^\top X))^{1/2}$$

强凸函数

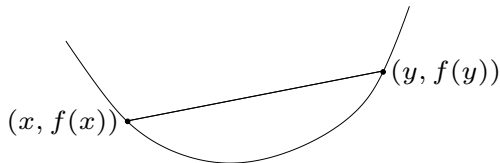
- **定义 2.17** 若存在常数 $m > 0$, 使得

$$g(x) = f(x) - \frac{m}{2}\|x\|^2$$

为凸函数, 则称 $f(x)$ 为**强凸函数**

- 为了方便也称 $f(x)$ 为 m -强凸函数

- **命题 2.3** 设 f 为强凸函数且存在最小值, 则 f 的最小值点唯一



凸函数判定定理

- **定理 2.6** $f(x)$ 是凸函数当且仅当对每个 $x \in \text{dom } f$, $v \in \mathbb{R}^n$, 函数 $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 是关于 t 的凸函数

$$g(t) = f(x + tv), \quad \text{dom } g = \{t \mid x + tv \in \text{dom } f\}$$

- **例 2.4** $f(X) = -\log \det X$ 是凸函数, 其中 $\text{dom } f = \mathcal{S}_{++}^n$

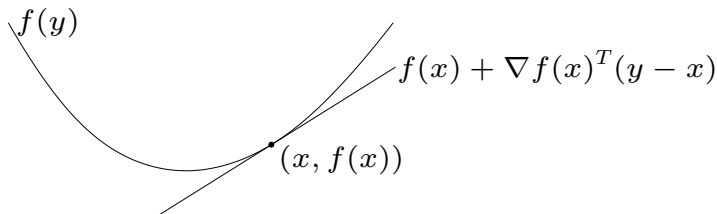
证明 任取 $X \succ 0$ 以及方向 $V \in \mathcal{S}^n$, 将 f 限制在直线 $X + tV$ 上, 则

$$\begin{aligned} g(t) &= -\log \det(X + tV) \\ &= -\log \det X - \log \det(I + tX^{-1/2}VX^{-1/2}) \\ &= -\log \det X - \sum_{i=1}^n \log(1 + t\lambda_i) \end{aligned}$$

一阶条件

- **定理 2.7** 对于定义在凸集上的可微函数 f , 则 f 是凸函数当且仅当

$$f(y) \geq f(x) + \nabla f(x)^\top (y - x) \quad \forall x, y \in \text{dom } f$$



- **定理 2.8** 设 f 为可微函数, 则 f 为凸函数当且仅当 $\text{dom } f$ 为凸集且 ∇f 为单调映射

$$(\nabla f(x) - \nabla f(y))^\top (x - y) \geq 0, \quad \forall x, y \in \text{dom } f$$

二阶条件

- **定理 2.9** 设 f 为定义在凸集上的二阶连续可微函数, 则 f 是凸函数当且仅当

$$\nabla^2 f(x) \succeq 0 \quad \forall x \in \text{dom } f$$

- 如果 $\nabla^2 f(x) \succ 0 \quad \forall x \in \text{dom } f$, 则 f 是**严格凸函数**

- **例 2.5** 最小二乘函数 $f(x) = \|Ax - b\|_2^2$

$$\nabla f(x) = 2A^\top(Ax - b), \quad \nabla^2 f(x) = 2A^\top A$$

对任意 A , 函数 f 都是凸函数

■ **定理 2.10** 函数 $f(x)$ 为凸函数当且仅当其上方图 $\text{epi } f$ 是凸集

证明 (必要性) 若 f 为凸函数, 则对任意 $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \in \text{epi } f, t \in [0, 1]$ 有

$$ty_1 + (1 - t)y_2 \geq tf(x_1) + (1 - t)f(x_2) \geq f(tx_1 + (1 - t)x_2)$$

故 $(tx_1 + (1 - t)x_2, ty_1 + (1 - t)y_2) \in \text{epi } f, t \in [0, 1]$

(充分性) 若 $\text{epi } f$ 是凸集, 则对任意 $x_1, x_2 \in \text{dom } f, t \in [0, 1]$ 有

$$(tx_1 + (1 - t)x_2, tf(x_1) + (1 - t)f(x_2)) \in \text{epi } f$$

\Downarrow

$$f(tx_1 + (1 - t)x_2) \leq tf(x_1) + (1 - t)f(x_2)$$

凸函数的判断方法

- 用定义验证（通常将函数限制在一条直线上）
- 利用一阶条件、二阶条件
- 直接研究 f 的上方图 $\text{epi } f$
- 说明 f 可由简单的凸函数通过保凸运算得到
 - 非负加权和
 - 与仿射函数复合
 - 逐点取最大值
 - 与标量向量函数复合

非负加权和与仿射函数的复合

- **定理 2.11** (1) 若 f 是凸函数, 则 αf 是凸函数, 其中 $\alpha \geq 0$
- **定理 2.11** (2) 若 f_1, f_2 是凸函数, 则 $f_1 + f_2$ 是凸函数
- **定理 2.11** (3) 若 f 是凸函数, 则 $f(Ax + b)$ 是凸函数

例子

□ 线性不等式的对数障碍函数

$$f(x) = -\sum_{i=1}^m \log(b_i - a_i^\top x), \quad \text{dom } f = \{x \mid a_i^\top x < b_i, i = 1, \dots, m\}$$

□ 仿射函数的 (任意) 范数 $f(x) = \|Ax + b\|$

逐点取最大值

■ **定理 2.11** (4) 若 f_1, \dots, f_m 是凸函数, 则

$$f(x) = \max\{f_1(x), \dots, f_m(x)\}$$

是凸函数

例子

□ 分段线性函数

$$f(x) = \max_{i=1, \dots, m} (a_i^\top x + b_i)$$

□ $x \in \mathbb{R}^n$ 的前 r 个最大分量之和

$$f(x) = x_{[1]} + x_{[2]} + \dots + x_{[r]}$$

$$\Updownarrow$$

$$f(x) = \max\{x_{i_1} + x_{i_2} + \dots + x_{i_r} \mid 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_r \leq n\}$$

- **定理 2.11** (5) 若对每个 $y \in \mathcal{A}$, $f(x, y)$ 是关于 x 的凸函数, 则

$$g(x) = \sup_{y \in \mathcal{A}} f(x, y)$$

是凸函数

例子

- 集合 C 点到给定点 x 的最远距离

$$f(x) = \sup_{y \in C} \|x - y\|$$

- 对称矩阵 $X \in \mathcal{S}^n$ 的最大特征值

$$\lambda_{\max}(X) = \sup_{\|y\|_2=1} y^\top X y$$

与函数的复合

■ **定理 2.11** (6) 给定函数 $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 和 $h: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$,

$$f(x) = h(g(x))$$

若 g 是凸函数, h 是凸函数且单调不减,
 g 是凹函数, h 是凸函数且单调不增, 那么 f 是凸函数

例子

- 如果 g 是凸函数, 则 $\exp g(x)$ 是凸函数
- 如果 g 是正值凹函数, 则 $1/g(x)$ 是凸函数

- **定理 2.11** (7) 若 $f(x, y)$ 关于 (x, y) 整体是凸函数, \mathcal{C} 是凸集, 则

$$g(x) = \inf_{y \in \mathcal{C}} f(x, y)$$

是凸函数

例子

- 考虑函数 $f(x, y) = x^\top Ax + 2x^\top By + y^\top Cy$, 海瑟矩阵满足

$$\begin{bmatrix} A & B \\ B^\top & C \end{bmatrix} \succeq 0, \quad C \succ 0$$

则 $f(x, y)$ 为凸函数. 对 y 求最小值得

$$g(x) = \inf_y f(x, y) = x^\top (A - BC^{-1}B^\top)x$$

- 点 x 到凸集 \mathcal{S} 的距离 $\text{dist}(x, \mathcal{S}) = \inf_{y \in \mathcal{S}} \|x - y\|$ 是凸函数

凸函数的性质

■ **命题 2.4** 设 $f(x)$ 是凸函数, 则 $f(x)$ 的所有的 α -下水平集为凸集

■ **引理 2.2** 设 $f(x)$ 是参数为 m 的可微强凸函数, 则如下不等式成立

$$g(y) \geq f(x) + \nabla f(x)^\top (y - x) + \frac{m}{2} \|y - x\|^2, \quad \forall x, y \in \text{dom } f$$

证明 由强凸函数的定义有 $g(x) = f(x) - \frac{m}{2} \|y - x\|^2$ 是凸函数. 根据凸函数的一阶条件知

$$g(y) \geq g(x) + \nabla g(x)^\top (y - x)$$

$$\Downarrow$$

$$\begin{aligned} f(y) &\geq f(x) - \frac{m}{2} \|x\|^2 + \frac{m}{2} \|y\|^2 + (\nabla f(x) - mx)^\top (y - x) \\ &= f(x) + \nabla f(x)^\top (y - x) + \frac{m}{2} \|y - x\|^2 \end{aligned}$$

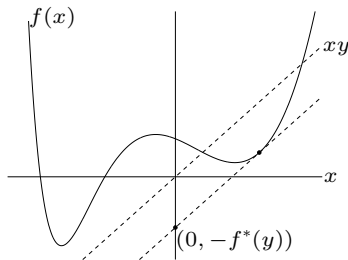
- 2.1 范数
- 2.2 导数
- 2.3 广义实值函数
- 2.4 凸集
- 2.5 凸函数
- 2.6 共轭函数
- 2.7 次梯度

共轭函数

- **定义 2.19** 适当函数 f 的**共轭函数**定义为

$$f^*(y) = \sup_{x \in \text{dom } f} (y^\top x - f(x))$$

- 无论 f 是否是凸函数, f^* 恒为凸函数



- **命题 2.5** Fenchel 不等式 $f(x) + f^*(y) \geq x^\top y \quad \forall x, y$

例 2.6

■ 考虑二次函数

$$f(x) = \frac{1}{2}x^\top Ax + b^\top x + c$$

□ 强凸情形 ($A \succ 0$) 知

$$f^*(y) = \frac{1}{2}(y - b)^\top A^{-1}(y - b) - c$$

□ 一般凸情形 ($A \succeq 0$) 知

$$f^*(y) = \frac{1}{2}(y - b)^\top A^\dagger(y - b) - c, \quad \text{dom } f^* = \mathcal{R}(A) + b$$

这里 $\mathcal{R}(A)$ 为 A 的像空间

例 2.7

- 给定凸集 \mathcal{C} , 示性函数为

$$I_{\mathcal{C}}(x) = \begin{cases} 0, & x \in \mathcal{C} \\ +\infty, & x \notin \mathcal{C} \end{cases}$$

共轭函数

$$\begin{aligned} I^*(y) &= \sup_x \{y^\top x - I_{\mathcal{C}}(x)\} \\ &= \sup_{x \in \mathcal{C}} y^\top x \end{aligned}$$

- $I^*(y)$ 称为凸集 \mathcal{C} 的**支撑函数**

二次共轭函数

- **定义 2.20** 任一函数 f 的二次共轭函数定义为

$$f^{**}(x) = \sup_{y \in \text{dom } f^*} (x^\top y - f^*(y))$$

- **定理 2.12** 若 f 为闭凸函数, 则

$$f^{**}(x) = f(x)$$

- **性质** 若 f 为闭凸函数, 则

$$y \in \partial f(x) \quad \Leftrightarrow \quad x \in \partial f^*(y) \quad \Leftrightarrow \quad x^\top y = f(x) + f^*(y)$$

- 2.1 范数
- 2.2 导数
- 2.3 广义实值函数
- 2.4 凸集
- 2.5 凸函数
- 2.6 共轭函数
- 2.7 次梯度

次梯度

- 回顾可微凸函数 f 的一阶条件

$$f(y) \geq f(x) + \nabla f(x)^\top (y - x)$$

- **定义 2.21** 设 f 为适当凸函数, x 为 $\text{dom } f$ 中的一点. 若向量 $g \in \mathbb{R}^n$ 满足

$$f(y) \geq f(x) + g^\top (y - x), \quad \forall y \in \text{dom } f$$

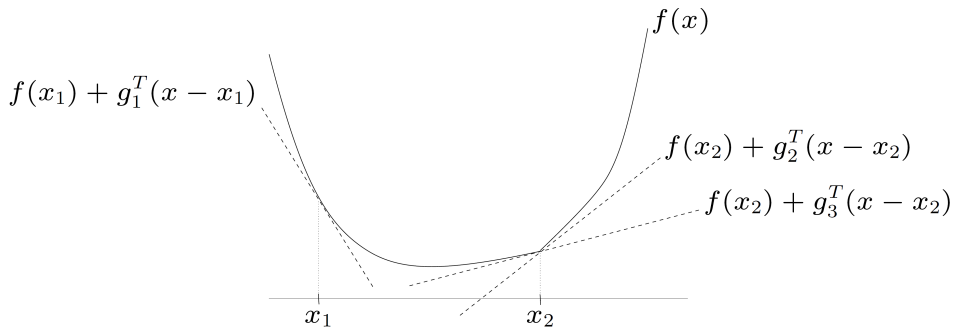
则称 g 为函数 f 在点 x 处的一个**次梯度**. 进一步, 称集合

$$\partial f(x) = \{g \mid g \in \mathbb{R}^n, f(y) \geq f(x) + g^\top (y - x), \forall y \in \text{dom } f\}$$

为 f 在点 x 处的**次微分**

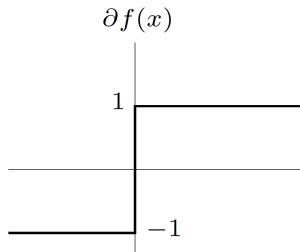
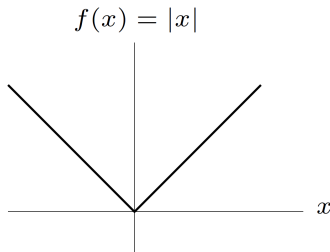
次梯度

- g_1 是点 x_1 处的次梯度
- g_2, g_3 是点 x_2 处的次梯度



例子

■ 绝对值函数 $f(x) = |x|$



■ 欧几里得范数 $f(x) = \|x\|_2$

若 $x \neq 0$, $\partial f(x) = \frac{1}{\|x\|_2}x$, 若 $x = 0$, $\partial f(x) = \{g \mid \|g\|_2 \leq 1\}$

次梯度的性质

■ **定理 2.13** 设 f 是凸函数, 则 $\partial f(x)$ 有如下性质

- 对任何 $x \in \text{dom } f$, $\partial f(x)$ 是一个闭凸集 (可能为空集)
- 如果 $x \in \text{int dom } f$, 则 $\partial f(x)$ 非空有界集

■ **命题 2.6** 设凸函数 $f(x)$ 在 $x \in \text{int dom } f$ 处可微, 则

$$\partial f(x) = \{\nabla f(x)\}$$

■ **定理 2.14** 设 $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ 为凸函数, $x, y \in \text{dom } f$, 则

$$(u - v)^\top (x - y) \geq 0$$

其中 $u \in \partial f(x)$, $v \in \partial f(y)$

两个函数之和的次梯度

- **定理 2.15** 设 $f_1, f_2 : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, +\infty]$ 是凸函数, 则对任意的 $x \in \mathbb{R}^n$ 有

$$\partial f_1(x) + \partial f_2(x) \subseteq \partial(f_1 + f_2)(x)$$

进一步, 若 $\text{int dom } f_1 \cap \text{dom } f_2 \neq \emptyset$, 则对任意的 $x_0 \in \mathbb{R}^n$ 有

$$\partial(f_1 + f_2)(x) = \partial f_1(x) + \partial f_2(x)$$

- 若 $f(x) = \alpha_1 f_1(x) + \alpha_2 f_2(x)$, $\alpha_1, \alpha_2 \geq 0$, 则 $f(x)$ 的次微分

$$\partial f(x) = \alpha_1 \partial f_1(x) + \alpha_2 \partial f_2(x)$$

- Moreau-Rockafellar 定理

函数族的上确界

■ **定理 2.16** 设 $f_1, f_2, \dots, f_m : \mathbb{R}^n \rightarrow (-\infty, +\infty]$ 均为凸函数, 令

$$f(x) = \max\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\}, \quad \forall x \in \mathbb{R}^n$$

对 $x_0 \in \bigcap_{i=1}^m \text{int dom } f_i$, 定义 $I(x_0) = \{i \mid f_i(x_0) = f(x_0)\}$, 则

$$\partial f(x_0) = \text{conv} \bigcup_{i \in I(x_0)} \partial f_i(x_0)$$

□ $I(x_0)$ 表示点 x_0 处 “有效” 函数的指标

□ $\partial f(x_0)$ 是点 x_0 处 “有效” 函数的次微分并集的凸包

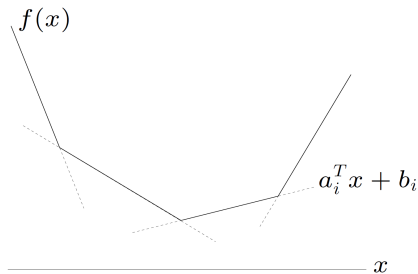
■ 如果 f_i 可微, $\partial f(x_0) = \text{conv}\{\nabla f_i(x_0) \mid i \in I(x_0)\}$

■ 分段线性函数

$$f(x) = \max_{i=1,2,\dots,m} \{a_i^\top x + b_i\}$$

点 x 处的次微分是一个多面体

$$\partial f(x) = \text{conv}\{a_i \mid i \in I(x)\}, \quad I(x) = \{i \mid a_i^\top x + b_i = f(x)\}$$



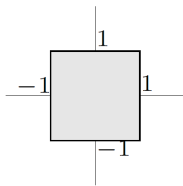
例 2.12

■ ℓ_1 -范数

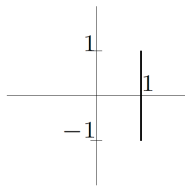
$$f(x) = \|x\|_1 = \max_{s \in \{-1,1\}^n} s^\top x$$

点 x 处的次微分是

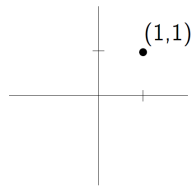
$$\partial f(x) = J_1 \times \cdots \times J_n, \quad J_k = \begin{cases} [-1, 1], & x_k = 0 \\ \{1\}, & x_k > 0 \\ \{-1\}, & x_k < 0 \end{cases}$$



$$\partial f(0, 0) = [-1, 1] \times [-1, 1]$$



$$\partial f(1, 0) = \{1\} \times [-1, 1]$$



$$\partial f(1, 1) = \{(1, 1)\}$$

Q&A

Thank you!

感谢您的聆听和反馈