



统计数据分析习题

清华大学高能物理研究中心

内部资料，仅供教学使用。

目录

第一章 基本概念	1
第二章 常用概率密度函数	3
第三章 蒙特卡洛方法	5
第四章 统计检验	8
第五章 参数估计的一般概念	12
第六章 最大似然法	14
第七章 最小二乘法	19
第八章 矩方法	24
第九章 统计误差、置信区间和极限	25
第十章 特征函数	28
References	30

第一章 基本概念

习题 1.1. 考虑某样本空间 S 以及给定子空间 B , 并假设 $P(B) > 0$. 证明条件概率

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (1.1)$$

满足概率的公理。

习题 1.2. 证明

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B).$$

(提示: 将 $A \cup B$ 表示成 3 个不相交的子集的并。)

习题 1.3. 某粒子束流包含 10^{-4} 的电子, 其余为光子。粒子通过某双层探测器, 可能在 2 层都给出信号, 也可能只有一层给出信号或者没有任何信号。电子 (e) 和光子 (γ) 在穿过该双层探测器给出 0, 1 或 2 个信号的概率如下

$P(0 e) = 0.001$	$P(0 \gamma) = 0.99899$
$P(1 e) = 0.01$	$P(1 \gamma) = 0.001$
$P(2 e) = 0.989$	$P(2 \gamma) = 10^{-5}$

(a) 如果只有一层给出信号, 该粒子为光子的概率是多少?

(b) 如果两层都给出了信号, 该粒子为电子的概率是多少?

习题 1.4. 假设随机变量 x 的概率密度函数为 $f(x)$ 。证明 $y = x^2$ 的概率密度函数为

$$g(y) = \frac{1}{2\sqrt{y}}f(\sqrt{y}) + \frac{1}{2\sqrt{y}}f(-\sqrt{y}). \quad (1.2)$$

习题 1.5. 假设两个独立的随机变量 x 和 y 都服从 0 到 1 之间的均匀分布, 即概率密度函数 $g(x)$ 为

$$g(x) = \begin{cases} 1 & 0 < x < 1 \\ 0 & \text{其它,} \end{cases} \quad (1.3)$$

概率密度函数 $h(y)$ 与 $g(x)$ 类似。

(a) 利用 *Statistical Data Analysis* 中的 (1.35) 式, 证明, $z = xy$ 的概率密度函数 $f(z)$ 为

$$f(z) = \begin{cases} -\log z & 0 < z < 1, \\ 0 & \text{其它.} \end{cases} \quad (1.4)$$

(b) 利用 *Statistical Data Analysis* 的 (1.37) 和 (1.38) 式, 通过另外定义一个函数 $u = x$, 求 $z = xy$ 的概率密度函数。首先求 z 和 u 的联合概率密度函数, 然后对 u 进行积分求出 z 的概率密度函数。

(c) 证明 z 的累积分布为

$$F(z) = z(1 - \log z). \quad (1.5)$$

习题 1.6. 考虑随机变量 x 与常数 α 和 β 。证明

$$\begin{aligned} E[\alpha x + \beta] &= \alpha E[x] + \beta, \\ V[\alpha x + \beta] &= \alpha^2 V[x]. \end{aligned} \quad (1.6)$$

习题 1.7. 考虑两个随机变量 x 和 y 。

(a) 证明 $\alpha x + y$ 的方差为

$$\begin{aligned} V[\alpha x + y] &= \alpha^2 V[x] + V[y] + 2\alpha \text{cov}[x, y] \\ &= \alpha^2 V[x] + V[y] + 2\alpha \rho \sigma_x \sigma_y, \end{aligned} \quad (1.7)$$

其中 α 为任意常数, $\sigma_x^2 = V[x]$, $\sigma_y^2 = V[y]$, 关联系数 $\rho = \text{cov}[x, y] / \sigma_x \sigma_y$ 。

(b) 利用 (a) 的结果, 证明关联系数总是位于区间 $-1 \leq \rho \leq 1$ 。(利用 $V[\alpha x + y]$ 的方差总是大于或等于零。)

习题 1.8. 假设随机变量 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ 用联合概率密度函数 $f(\mathbf{x})$ 描述, 而变量 $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_n)^T$ 由下面的线性变换定义

$$y_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} x_j. \quad (1.8)$$

假设反变换 $\mathbf{x} = A^{-1}\mathbf{y}$ 存在。

(a) 证明 \mathbf{y} 的联合概率密度函数为

$$g(\mathbf{y}) = f(A^{-1}\mathbf{y}) |\det(A^{-1})|. \quad (1.9)$$

(b) 当 A 为矩阵, 即 $A^{-1} = A^T$ 时, 求 $g(\mathbf{y})$ 。

第二章 常用概率密度函数

习题 2.1. 考虑 N 个服从多项分布的随机变量 $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_N)$, 概率为 $\mathbf{p} = (p_1, \dots, p_N)$, 并且总试验次数为 $n_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^N n_i$ 。假设变量 k 定义为前 M 个 n_i 之和,

$$k = \sum_{i=1}^M n_i, \quad M \leq N. \quad (2.1)$$

利用误差传递以及多项分布的协方差

$$\text{cov}[n_i, n_j] = \delta_{ij} n_{\text{tot}} p_i (1 - p_i) + (\delta_{ij} - 1) p_i p_j n_{\text{tot}}, \quad (2.2)$$

求 k 的方差。证明该方差等于 $p = \sum_{i=1}^M p_i$ 并且总试验次数为 n_{tot} 的二项分布的方差。

习题 2.2. 假设随机变量 x 均匀分布于区间 $[\alpha, \beta]$, $\alpha, \beta > 0$ 。求 $1/x$ 的期待值, 并将结果与 $1/E[x]$ 进行比较, 取 $\alpha = 1, \beta = 2$ 。

习题 2.3. 考虑指数分布

$$f(x; \xi) = \frac{1}{\xi} e^{-x/\xi}, \quad x \geq 0. \quad (2.3)$$

(a) 证明对应的累积分布函数为

$$F(x) = 1 - e^{-x/\xi}, \quad x \geq 0. \quad (2.4)$$

(b) 证明给定 $x > x_0$ 时 x 处于 x_0 与 $x_0 + x'$ 之间的条件概率等于 x 小于 x' 的概率 (非条件概率), 即

$$P(x \leq x_0 + x' | x \geq x_0) = P(x \leq x'). \quad (2.5)$$

(c) 产生于大气上层的宇宙线 μ 子进入海平面的探测器, 其中的一部分在探测器中停止并衰变。进入探测器与衰变的时间差 t 服从指数分布, t 的均值等于 μ 子的平均寿命 (近似为 $2.2\mu\text{S}$)。解释为什么 μ 子进入探测器前存活的时间对确定平均寿命没有影响。

习题 2.4. 假设 y 服从均值为 μ , 方差为 σ^2 的高斯分布。

(a) 证明

$$x = \frac{y - \mu}{\sigma} \quad (2.6)$$

服从标准高斯分布 $\varphi(x)$ (即, 均值为零, 方差为 1)。

(b) 证明累积分布函数 $F(y)$ 与 $\Phi(x)$ 相等, 即

$$F(y) = \Phi\left(\frac{y - \mu}{\sigma}\right). \quad (2.7)$$

习题 2.5.

(a) 证明, 如果 y 服从均值为 μ 方差为 σ^2 的高斯分布, 则 $x = e^y$ 服从对数正态分布,

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \frac{1}{x} \exp\left(-\frac{(\log x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.8)$$

(b) 通过积分

$$\begin{aligned} E[x] &= \int x f(x; \mu, \sigma^2) dx, \\ V[x] &= \int (x - E[x])^2 f(x; \mu, \sigma^2) dx. \end{aligned} \quad (2.9)$$

求 x 的均值与方差。

(c) 将 (b) 中求得的方差与通过误差传递 ($V[y] = \sigma^2$) 得到的近似结果进行比较。在什么条件下误差传递近似成立? (注意 y 是无量纲的, 因而 σ^2 也是无量纲的。)

习题 2.6. 证明自由度为 n 的 χ^2 分布的累积分布函数可以表示为

$$F_{\chi^2}(x; n) = P\left(\frac{x}{2}, \frac{n}{2}\right), \quad (2.10)$$

其中 P 为不完全伽马函数 (*incomplete gamma function*)

$$P(x, n) = \frac{1}{\Gamma(n)} \int_0^x e^{-t} t^{n-1} dt. \quad (2.11)$$

第三章 蒙特卡洛方法

习题 3.1. 写一段小程序，利用 ROOT 中的随机数产生子产生 10^4 个 $(0, 1]$ 之间均匀分布的随机数，将并结果画到直方图中（分 100 个区间）。

习题 3.2. 修改习题 3.1 中的直方图，使其只有 5 个区间，事例数 $N = 100$ 。产生的直方图可以看做对矢量 (n_1, \dots, n_5) 的观测，该矢量满足参数 $N = 100$, $p_i = 0.2 (i = 1, \dots, 5)$ 的多项分布。

(a) 将上面的程序代码放到循环中产生直方图，重复该 MC 实验 100 次，每次用不同的随机数种子。只要保证每次实验程序不中断，程序在下次实验（即下一个循环）时自动更新种子。定义一个直方图，将每次实验第 i 个区间（比如 $i = 3$ ）的值填充其中。这应该服从均值为 $Np_i = 20$ ，标准偏差为 $\sqrt{Np_i(1-p_i)} = 4$ 的二项分布。

(b) 为任意两个区间的值 n_i 和 n_j 作出散点图（二维直方图）。其协方差的理论值为 $\text{cov}[n_i, n_j] = -Np_i p_j = -4$ ，或者说关联系数 $\rho = -4/4^2 = -0.25$ 。

习题 3.3. 考虑锯齿分布

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2x}{x_{\max}^2} & 0 < x < x_{\max}, \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (3.1)$$

(a) 参考课本 3.2 节，利用变换方法寻找函数 $x(r)$ ，以产生服从 $f(x)$ 的随机数。用程序实现该方法，并生成一个直方图。（可以取 $x_{\max} = 1$ 。）

(b) 参考课本 3.3 节，编写一段程序，利用舍选法产生服从锯齿分布的随机数。画出相应的直方图。

习题 3.4. 该练习的目的是产生服从高斯分布的随机数。有很多算法可以产生高斯分布，一个最简单的适合教学目的算法基于中心极限定理：当 n 很大时， n 个随机数之和趋向于高斯分布，只要其中任何一项不占绝对份额（参考课本第 10 章）。

(a) 假设 x 均匀分布于 $[0, 1]$ ，考虑 n 个独立随机变量 x 之和，

$$y = \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.2)$$

证明 y 的期待值为 $n/2$ ，方差为 $n/12$ 。并证明变量 z

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n x_i - \frac{n}{2}}{\sqrt{n/12}} \quad (3.3)$$

均值为零，标准偏差为 1。

(b) 写一段小程序产生 (a) 中定义的变量 z ， n 可以为任意值。分别取 $n = 1, \dots, 20$ ，生成直方图，每个直方图包含 10^4 个 z 的值。何时 z 的分布近似为高斯分布？作为简单的高斯分布产生子，可以取 $n = 12$ 。评论此算法的局限性。选作：对于 $n = 2$ ，推导出 z 的概率密度函数的明显形式。

习题 3.5. 变量 t 服从均值 $\tau = 1$ 的指数分布, x 服从均值 $\mu = 0$, 标准偏差 $\sigma = 0.5$ 的高斯分布。写一段 MC 程序, 产生变量

$$y = t + x. \quad (3.4)$$

这里 t 可以表示不稳定粒子的真实衰变时间, x 表示测量误差, 所以 y 表示测量到的衰变时间。画出 y 的直方图。修改程序以研究 $\tau \ll \sigma$ 和 $\tau \gg \sigma$ 的情形。

习题 3.6. 考虑服从 *Cauchy*(*Breit-Wigner*) 分布的随机变量 x ,

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{1+x^2}. \quad (3.5)$$

(a) 证明如果 r 均匀分布于 $[0, 1]$, 则

$$x(r) = \tan\left[\pi\left(r - \frac{1}{2}\right)\right] \quad (3.6)$$

服从 *Cauchy* 分布。

(b) 利用 (a) 中的结果, 写一段小程序产生 *Cauchy* 分布的随机数。产生 10^4 个事例并画出直方图。

(c) 修改 (b) 中的程序, 重复进行实验, 每次实验 n 个独立的柯西分布数值 (如取 $n = 10$)。对每个样本, 计算样本平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 。比较 \bar{x} 的直方图与 x 的原始直方图。(参见习题 10.8。)

习题 3.7. 光电倍增管是可以探测单个光子的设备, 如图 3.1 所示。¹

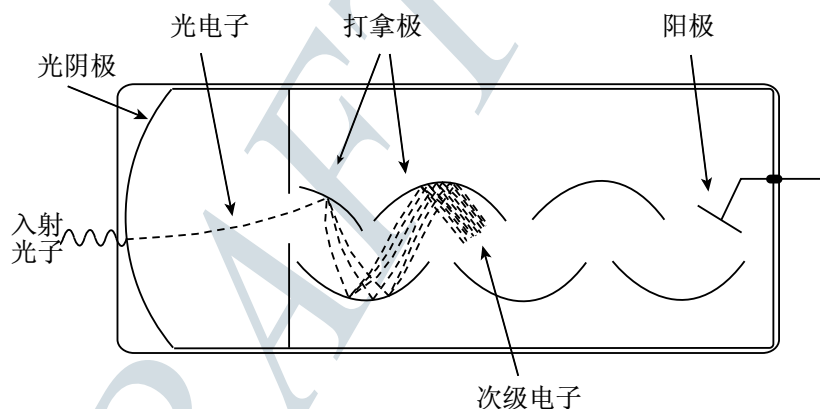


图 3.1: 光电倍增管的示意图。入射光子入射到光阴极上产生光电子, 光电子被加速到打拿极上产生次级电子。

光子打到光阴极上, 有一定的概率发射出一个电子 (光电子)。光电子在电场中向电极 (称为打拿极) 加速。当光电子撞到第一个打拿极时, 光电子可以进一步释放出电子。这些电子又被加速到第二个打拿极, 产生更多的电子。该过程一直持续, 直到最后一个打拿极产生的电子被收集到。

进入第 i 个打拿极的每个电子产生的次级电子的数目可以看成均值为 ν_i 的泊松变量 n_i , 一般而言, 对每个打拿极均值 ν_i 不同。假设光电倍增管有 N 个打拿极, 单个入射光电子在最终产生的电子数目 n_{out} 的期待值 (光电倍增管的增益) 为

$$\nu_{\text{out}} = E[n_{\text{out}}] = \prod_{i=1}^N \nu_i. \quad (3.7)$$

¹ 更详细的描述请参见, 例如, C. Grupen, A. Böhrer and L. Smolik, *Particle Detectors*, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

(a) 写一段蒙特卡洛程序，计算 $N = 6$ 时单个光电子产生的电子数 n_{out} 的分布，对所有打拿极取 $\nu = 3.0$ 。(ROOT 中可以直接调用函数产生泊松分布。) 运行程序产生 $M = 1000$ 个光电子事例，并作出 n_{out} 的直方图。通过计算样本平均以及样本方差

$$\bar{n}_{\text{out}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M n_{\text{out},i} \quad (3.8)$$

$$s_{\text{out}}^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (n_{\text{out},i} - \bar{n}_{\text{out}})^2 \quad (3.9)$$

以估计均值 ν_{out} 和方差 $V[n_{\text{out}}] = \sigma_{\text{out}}^2$ 。(样本平均和方差详见 *Statistical Data Analysis* 第 5 章。) 将样本平均与 (3.7) 式给出的值进行比较。比较样本方差 (或标准偏差) 与均值为 ν_{out} 的泊松变量的方差。定量解释为什么 n_{out} 的标准偏差远大于泊松变量的标准偏差。

(b) 我们希望 n_{out} 的标准偏差尽量小，以便能够尽可能精确地确定初始光电子的数目 (从而可以估计入射光子的数目)。某些应用中，需要标准偏差小到可以区分 1 个和 2 个光子，因此希望使相对分辨率 (即标准偏差与均值的比值) 小于 1。减小方差的方法之一是提高第一个打拿极产生电子的均值，这可以通过增大电压使得光电子入射到打拿极的能量更高，也可以通过选取较低功函数的金属 (即提高发射次级电子的概率)。

修改 (a) 中的程序，把第一个打拿极的均值增大 (比如增大至 6)。运行程序并估计 n_{out} 的标准偏差与均值的比值。定量解释为什么这种情形比所有 ν_i 都相同时的分辨率更好。为什么提交后面打拿极的增益对提高分辨率作用不大？

(c) 尝试将程序改成模拟 $N = 12$ 个打拿极。你将发现模拟每个打拿极上每个电子的碰撞需要太长时间。换个思路，取 $N = 6$ 运行足够多的事例从而获得足够精确的 n_{out} 的分布 (例如至少 $M \approx 10^4$ ，分 50 个区间作出 $0 \leq n_{\text{out}} \leq 5000$ 之间的直方图)。用任何方法，比如舍选法，产生服从该分布的随机数。对前 6 个打拿极得到的每个电子，用同样方法模拟该电子在后面 6 个打拿极产生的电子数目。对前 6 个打拿极，取 $\nu_1 = 6$ ，其余 $\nu_i = 3$ ；对后 6 个打拿极，全部取 $\nu_i = 3$ 。

第四章 统计检验

习题 4.1. 带电粒子穿过气体会产生电离现象，电离数依赖于入射粒子的类型。假设基于电离测量构造了某统计检验量 t ，使其服从高斯分布。如果带电粒子是电子，高斯分布中心值为 0，标准偏差为 1；如果带电粒子是 π 介子，则高斯分布中心值为 2，标准偏差为 1。构造某个检验，通过要求 $t < 1$ 将电子选择出来。

- (a) 该检验的显著水平 (*significance level*) 如何? (即, 在拒绝域中接受电子的概率)
- (b) 该检验排除假设粒子为 π 介子的功效 (*power*) 多大? 有多大概率将 π 介子鉴别为电子?
- (c) 假设已知粒子样本中包含 99% 的 π 介子以及 1% 的电子, $t < 1$ 的判选条件得到的电子样本的纯度 (*purity*) 有多少?
- (d) 假设我们要求电子样本的纯度至少 95%, 统计检验的拒绝域应该如何选 (即判选条件)? 如果选用该判选条件, 该检验接受电子的效率有多大, 显著水平有多大?

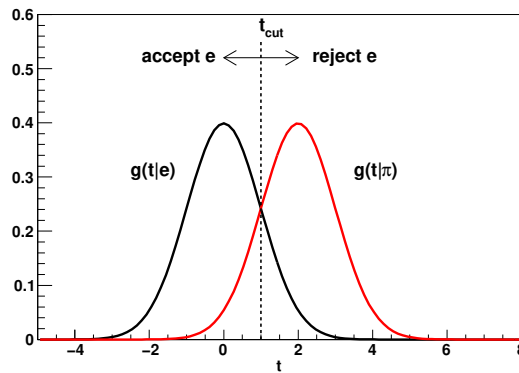


图 4.1: 用于判选 e 和 π 的统计检验量 t , 判选条件为 $t_{\text{cut}} = 1$ 。

习题 4.2. 考虑某统计检验量由输入变量 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ 的线性组合构成, 系数为 $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n)$,

$$t(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n a_i x_i = \mathbf{a}^T \mathbf{x}. \quad (4.1)$$

假设在 H_0 和 H_1 两种假设下, \mathbf{x} 的均值分别为 $\boldsymbol{\mu}_0$ 和 $\boldsymbol{\mu}_1$, 协方差矩阵分别为 V_0 和 V_1 , 统计检验量 t 的均值分别为 τ_0 和 τ_1 , 方差为 Σ_0^2 和 Σ_1^2 (见 *Statistical Data Analysis* 第 4.4.1 节)。

(a) 证明使分离

$$J(\mathbf{a}) = \frac{(\tau_0 - \tau_1)^2}{\Sigma_0^2 + \Sigma_1^2} \quad (4.2)$$

达到最大的系数 \mathbf{a} 由下式给出

$$\mathbf{a} = W^{-1}(\boldsymbol{\mu}_0 - \boldsymbol{\mu}_1), \quad (4.3)$$

其中 $W = V_0 + V_1$ 。这定义了 *Fisher* 线性甄别式。

(b) 假设 $V_0 = V_1 = V$ ，并且输入变量的概率密度函数 $f(\mathbf{x}|H_0)$ 和 $f(\mathbf{x}|H_1)$ 是多维高斯分布，中心值分别为 $\boldsymbol{\mu}_0$ 和 $\boldsymbol{\mu}_1$ (参见 *Statistical Data Analysis* 的方程 (4.26))。取两个假设的先验概率分别为 π_0 和 π_1 。利用 *Bayes* 定理，求出后验概率 $P(H_0|\mathbf{x})$ 和 $P(H_1|\mathbf{x})$ 作为 t 的函数。

(c) 证明通过推广统计检验量，使其包含一个偏置，

$$t(\mathbf{x}) = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i, \quad (4.4)$$

后验概率 $P(H_0|\mathbf{x})$ 可以表示为

$$P(H_0|\mathbf{x}) = \frac{1}{1 + e^{-t}}, \quad (4.5)$$

其中偏置 a_0 为

$$a_0 = -\frac{1}{2}\boldsymbol{\mu}_0^T V^{-1} \boldsymbol{\mu}_0 + \frac{1}{2}\boldsymbol{\mu}_1^T V^{-1} \boldsymbol{\mu}_1 + \log \frac{\pi_0}{\pi_1}. \quad (4.6)$$

习题 4.3. 正负电子对撞中观测到的具有特殊运动学性质的事例数可以被认为是一个泊松变量。假设对于给定积分亮度 (即给定束流强度时的取数时间)，从某已知过程得到的事例数为 3.9，然而实际上观测到 16 个。假设没有新物理过程对观测到的事例数有贡献，计算该假设的 P -值。计算泊松分布的求和时，可以利用关系式

$$\sum_{n=0}^m P(n; \nu) = 1 - F_{\chi^2}(2\nu; n_{\text{dof}}), \quad (4.7)$$

其中 $P(n; \nu)$ 是均值为 ν 的泊松分布的概率， F_{χ^2} 是自由度数目 $n_{\text{dof}} = 2(m+1)$ 的 χ^2 分布的累积分布函数。可以调用 ROOT 里面的 TMath 名字空间下的函数计算，或者查表得到。

习题 4.4. 表 4.1 是实验获得的数据与期待值的两种理论预言。前两列是区间的边界，第三列是对应的实验观测事例数 $n_i, i = 1, \dots, 20$ ，服从泊松分布。第四列和第五列给出期待值 $\nu_i = E[n_i]$ 的两种理论预言，如图 ?? 所示。

(a) 写一段程序，用直方图表示图中数据，画到一张图上，并根据 “Statistical Data Analysis” 的 (4.39) 式计算 χ^2 统计量。

(b) 因为很多区间的事例数很少甚至为零，前面计算的统计量不太可能服从 χ^2 分布。写一段程序，根据两种理论假设 **theory1** 和 **theory2** 给出真实的 χ^2 分布。如果利用 (a) 中的数据计算统计检验，其 P -值是多少？如果利用正常的 χ^2 分布计算， P -值是多少？

习题 4.5. 在放射性实验中，卢瑟福和盖革记录了固定时间间隔下 α 衰变的次数。数据如表 4.2 所示。假设放射源包含的放射性原子数目非常大，并且任意一个原子在小时间间隔内发射一个 α 粒子的概率很小，则可以认为在时间间隔 Δt 内发生衰变的次数 m 服从泊松分布。如果结果与该假设偏离，则表明 α 衰变不独立，比如可以想象某个原子发生 α 衰变，可能会引起近邻的其它原子也发生衰变，从而在短时间间隔内形成一个衰变簇团。

(a) 利用表 4.2 的数据，计算样本平均值

$$\bar{m} = \frac{1}{n_{\text{tot}}} \sum_m n_m m, \quad (4.8)$$

x_{\min}	x_{\max}	n (data)	ν (theory1)	ν (theory2)
0.0	0.5	1	0.2	0.2
0.5	1.0	0	1.2	0.7
1.0	1.5	3	1.9	1.1
1.5	2.0	4	3.2	1.6
2.0	2.5	6	4.0	1.9
2.5	3.0	3	4.5	2.2
3.0	3.5	3	4.7	2.7
3.5	4.0	4	4.8	3.3
4.0	4.5	5	4.8	3.6
4.5	5.0	7	4.5	3.9
5.0	5.5	4	4.1	4.0
5.5	6.0	5	3.5	4.0
6.0	6.5	2	3.0	3.9
6.5	7.0	0	2.4	3.5
7.0	7.5	1	1.6	3.2
7.5	8.0	0	0.9	2.8
8.0	8.5	0	0.5	2.2
8.5	9.0	1	0.3	1.5
9.0	9.5	0	0.2	1.0
9.5	10.0	0	0.1	0.5

表 4.1: 实验获得的数据与期待值的两种理论预言，前两列是区间的边界。

m	n_m	m	n_m
0	57	8	45
1	203	9	27
2	383	10	10
3	525	11	4
4	532	12	0
5	408	13	1
6	273	14	1
7	139	> 14	0

表 4.2: 卢瑟福与盖革实验数据，即在时间间隔 $\Delta t = 7.5\text{s}$ 内发生 m 次 α 衰变的次数。

以及样本的方差

$$s^2 = \frac{1}{n_{\text{tot}} - 1} \sum_m n_m (m - \bar{m}), \quad (4.9)$$

其中 n_m 是发生 m 个衰变的次数, $n_{\text{tot}} = \sum_m n_m = 2608$ 是测量时间内总衰变次数。求和从 $m = 0$ 一直到测量时间内最大的衰变次数 (次数为 $m = 14$)。利用 \bar{m} 和 s^2 , 求离散度

$$t = \frac{s^2}{\bar{m}}. \quad (4.10)$$

由于 \bar{m} 和 s^2 为 m 的均值和方差的估计量 (参见 *Statistical Data Analysis* 第 5 章), 并且如果 m 服从泊松分布, 则 \bar{m} 和 s^2 应该相等, 则可以预期 t 大约为 1。可以证明对泊松分布, 当 n_{tot} 很大时, $(n_{\text{tot}} - 1)t$ 服从自由度为 $n_{\text{tot}} - 1$ 的 χ^2 分布。而且, 当 n_{tot} 很大时, 该分布变成均值为 $n_{\text{tot}} - 1$, 方差为 $2(n_{\text{tot}} - 1)$ 的高斯分布。

(b) m 服从泊松分布这一假设的 P -值为多少? 为了表征 t 的观测值与泊松假设相符或不相符, 应该选取什么样的 t 值?

(c) 写一段蒙特卡洛程序产生很多组数据, 每组数据包含 n_{tot} 个服从泊松分布的 m 值。(泊松分布的随机数可以在 ROOT 中直接调用, `gRandom->Poisson(ν)`。)对于 m 的均值, 可以取表 4.2 中数据的均值 \bar{m} 。对每组数据, 计算 t 的值并填充至直方图。利用直方图和从卢瑟福实验数据得到的 t 值, 计算泊松假设的 P -值。将该结果与 (a) 中的结果进行比较。(选作: 将 $(n_{\text{tot}} - 1)t$ 记录至直方图, 与均值为 $n_{\text{tot}} - 1$, 方差为 $2(n_{\text{tot}} - 1)$ 的高斯分布进行比较。)

第五章 参数估计的一般概念

习题 5.1. 考虑随机数 x , 其均值和方差分别为 μ 和 σ^2 。假设样本空间由 n 次观测结果 x_1, x_2, \dots, x_n 构成。本题的目的是证明样本均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5.1)$$

为均值 μ 的一致性估计量。

(a) 第一步要证明 Chebyshev 不等式, 即只要 x 的方差存在, 对任意 $a > 0$, 下面式子成立:

$$P(|x - \mu| \geq a) \leq \frac{\sigma^2}{a^2}. \quad (5.2)$$

该式的证明需要用到方差的定义,

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx, \quad (5.3)$$

其中 $f(x)$ 为随机变量 x 的概率密度函数。利用如下事实: 如果积分区域限定为 $|x - \mu| \geq a$, 则积分 (5.3) 会变小, 如果用 a^2 替换 $(x - \mu)^2$, 则积分会更小。

(b) 利用 Chebyshev 不等式证明大数弱定理, 即, 对任意 $\epsilon > 0$,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \mu\right| \geq \epsilon\right) = 0. \quad (5.4)$$

这等价于, \bar{x} 是 μ 的一致性估计量, 只要 x 的方差存在。

习题 5.2. 考虑均值为 μ , 方差为 σ^2 的随机变量 x , 并得到样本值为 x_1, x_2, \dots, x_n 的样本空间。

(a) 假设均值 μ 已经利用样本均值 \bar{x} 估计。证明样本方差

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{n}{n-1} (\overline{x^2} - \bar{x}^2) \quad (5.5)$$

为方差 σ^2 的无偏估计量。(利用 $E[x_i x_j] = \mu^2 (i \neq j)$, $E[x_i^2] = \mu^2 + \sigma^2 (i = 1, 2, \dots, n)$ 。)

(b) 假设均值 μ 已知。证明 σ^2 的无偏估计量为

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 = \overline{x^2} - \mu^2. \quad (5.6)$$

习题 5.3.

(a) 证明样本方差 s^2 (5.5) 的方差为

$$V[s^2] = E[s^4] - (E[s^2])^2 = \frac{1}{n} \left(\mu_4 - \frac{n-3}{n-1} \mu_2^2 \right), \quad (5.7)$$

其中 $\mu_k = E[(x - \mu)^k]$ 为 x 的 k 阶中心矩。为此，需要先证明 s^2 可以写为

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j=1}^n x_i x_j. \quad (5.8)$$

然后证明 s^4 的期待值为

$$E[s^4] = \frac{1}{(n-1)^2} \sum_{i,j=1}^n E[x_i^2 x_j^2] - \frac{2}{n(n-1)^2} \sum_{i,j,k=1}^n E[x_i x_j x_k^2] + \frac{1}{n^2(n-1)^2} \sum_{i,j,k,l=1}^n E[x_i x_j x_k x_l]. \quad (5.9)$$

计算每个求和给出多少项代数矩 μ'_4 或 μ'^2_2 。注意其余所有项都 μ 的一次项或高次项。令 $\mu = 0$ ，将结果表示为中心矩 μ_2 和 μ_4 的函数。从中减掉习题5.2得到的 $(E[s^2])^2$ 即可得到结果。

(b) 如果 x 服从高斯分布，计算 s^2 的方差。利用高斯分布的4阶中心矩为 $\mu_4 = 3\sigma^4$ 。

第六章 最大似然法

习题 6.1.

- (a) 给定一组数据高斯分布的数据样本 x_1, \dots, x_n , 求均值 μ 和方差 σ^2 的最大似然估计量。
- (b) 将估计量 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}^2$ 同《统计数据分析》第 5 章定义的估计量 \bar{x} 和 s^2 联系起来, 计算 $\hat{\mu}$ 和 $\hat{\sigma}^2$ 的期待值和方差。
- (c) 通过计算

$$(V^{-1})_{ij} = -E \left[\frac{\partial^2 \log L}{\partial \theta_i \partial \theta_j} \right], \quad (6.1)$$

近似求解协方差矩阵的逆 (大统计样本有效)。其中 θ_i 和 θ_j , $i, j = 1, 2$ 分别为 μ 和 σ^2 。对 V^{-1} 求逆, 计算出协方差矩阵, 并将对角元素 (方差) 与 (b) 中求得的精确值比较。注意到, 在大样本极限下, (b) 和 (c) 的结果符合。

习题 6.2. 考虑某二项分布变量, 即 N 次试验中成功的次数 n , 单个实验试验成功的概率为 p 。如果只进行一次观测得到 n , p 的最大似然估计量为多少? 证明 \hat{p} 是无偏的, 并求其方差。证明 \hat{p} 的方差等于最小方差边界 (见《统计数据分析》(6.16) 式)。

习题 6.3.

- (a) 重新考虑二项分布的随机变量 n , 每次试验结果 (成功或失败) 的概率为 p 和 $q = 1 - p$ 。利用习题 6.2 得到的 p 的估计量, 构造不对称度

$$\alpha = p - q = 2p - 1 \quad (6.2)$$

的最大似然估计量 $\hat{\alpha}$, 并求标准差 $\sigma_{\hat{\alpha}}$ 。

- (b) 假设需要测量某个非常小的不对称度, 预计大约是 $\alpha \approx 10^{-3}$ 水平。如果要求标准差不大于 α 的三分之一, 至少需要多少次试验?

习题 6.4. 考虑泊松变量的单次观测值 n 。均值 ν 的最大似然估计量为多少? 证明该估计量是无偏的并求其方差。证明 $\hat{\nu}$ 的方差等于最小方差边界。

习题 6.5. 支持粒子物理标准模型的早期证据是观测到左手 (R) 和右手 (L) 极化的电子与氘靶的非弹散射截面 σ_R 和 σ_L 不同。对于给定积分亮度 L (正比于电子束流密度以及取数时间), 两种类型的事例数 n_R 和 n_L 均为泊松变量, 平均值分别为 ν_R 和 ν_L 。均值与散射截面的关系为 $\nu_R = \sigma_R L$ 和 $\nu_L = \sigma_L L$, 并且实验中两种情形的亮度 L 相同。利用习题的结果, 构造计划不对称度的估计量 $\hat{\alpha}$,

$$\alpha = \frac{\sigma_R - \sigma_L}{\sigma_R + \sigma_L}, \quad (6.3)$$

利用误差传递, 求标准差 $\sigma_{\hat{\alpha}}$, 用 α 和 $\nu_{tot} = \nu_R + \nu_L$ 表示。将此与习题 6.3 的结果进行比较。预计不对称度大约为 10^{-4} 水平, 要想使 $\sigma_{\hat{\alpha}}$ 比不对称度小一个数量级, 需要多少散射事例? (事例数非常大, 以至于事例

不能单独记录下来，而是测量探测器输出电流。参见 *C.Y. Prescott et al., Parity non-conservation in inelastic electron scattering, Phys. Lett. B77(1978)347.*)

习题 6.6. 随机变量 x 服从分布 $f(x; \theta)$ ，其中 θ 为未知参数。考虑样本空间 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$ ，以此构造 θ 的估计量 $\hat{\theta}(\mathbf{x})$ (不限于最大似然估计量)。证明 *Rao-Cramér-Frechet(RCF)* 不等式

$$V[\hat{\theta}] \geq \frac{\left(1 + \frac{\partial b}{\partial \theta}\right)^2}{-E\left[\frac{\partial^2 \log L}{\partial \theta^2}\right]}, \quad (6.4)$$

其中 $b = E[\hat{\theta}] - \theta$ 为估计量的偏置。可分以下几步证明：

(a) 首先，证明 *Cauchy-Schwarz* 不等式，即对任意两个随机变量 u 和 v ，

$$V[u]V[v] \geq (\text{cov}[u, v])^2, \quad (6.5)$$

其中 $V[u]$ 和 $V[v]$ 为方差， $\text{cov}[u, v]$ 为协方差。利用 $\alpha u + v$ 的方差必定大于等于零 (对任意 α)。然后考虑特殊情形 $\alpha = (V[v]/V[u])^{1/2}$ 。

(b) 利用 *Cauchy-Schwarz* 不等式，令

$$\begin{aligned} u &= \hat{\theta}, \\ v &= \frac{\partial}{\partial \theta} \log L, \end{aligned} \quad (6.6)$$

其中 $L = f_{\text{joint}}(\mathbf{x}; \theta)$ 为似然函数，也是 \mathbf{x} 的联合概率密度函数。代入 (6.5)，表示出 $V[\hat{\theta}]$ 的下界。这里要注意的是，我们将似然函数看成 \mathbf{x} 的函数，即似然函数本身也是一个随机变量。

(c) 假设对 θ 的微分可以移到积分的外面，证明

$$E\left[\frac{\partial}{\partial \theta} \log L\right] = \int \cdots \int f_{\text{joint}}(\mathbf{x}; \theta) \frac{\partial}{\partial \theta} \log f_{\text{joint}}(\mathbf{x}; \theta) dx_1 \cdots dx_n = 0. \quad (6.7)$$

我们将推导的 *RCF* 不等式的形式依赖于该假设，这在感兴趣的问题中一般都成立。(只要积分的极限不依赖于 θ ，该假设总是成立的。) 利用 (6.7) 与 (6.5)、(6.6)，证明

$$V[\hat{\theta}] \geq \frac{\left(E\left[\hat{\theta} \frac{\partial \log L}{\partial \theta}\right]\right)^2}{E\left[\left(\frac{\partial \log L}{\partial \theta}\right)^2\right]}. \quad (6.8)$$

(d) 证明 (6.8) 的分子可以表示为

$$E\left[\hat{\theta} \frac{\partial \log L}{\partial \theta}\right] = 1 + \frac{\partial b}{\partial \theta}, \quad (6.9)$$

分母可以表示为

$$E\left[\left(\frac{\partial \log L}{\partial \theta}\right)^2\right] = -E\left[\frac{\partial^2 \log L}{\partial \theta^2}\right]. \quad (6.10)$$

再次假设对 θ 的微分与对 \mathbf{x} 的积分可以互换次序。将 (c) 和 (d) 的结果放到一起即可证明 (6.4)。

习题 6.7. 写一段程序，根据指数分布

$$f(t; \tau) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau}, \quad t \geq 0, \quad (6.11)$$

产生样本容量为 n 的样本 (t_1, \dots, t_n) 。

(a) 证明 τ 的最大似然估计量由样本平均 $\hat{\tau} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ 给出。产生 1000 个 $\tau = 1$, $n = 10$ 的样本。对每个样本计算 $\hat{\tau}$ 并做直方图。比较 $\hat{\tau}$ 的均值与真值 $\tau = 1$ 。

(b) 假设 t 的概率密度函数的参数为 $\lambda = 1/\tau$, 即

$$f(t; \lambda) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0, \quad (6.12)$$

证明 λ 的最大似然估计量为 $\hat{\lambda} = 1/\sum_{i=1}^n t_i$ 。修改 (a) 中的程序, 加入 $\hat{\lambda}$ 的直方图。比较 $\hat{\lambda}$ 的均值与真值 $\lambda = 1$ 。对 $n = 5, 10, 100$ 三种情况, 分别数值计算偏置 $b = E[\hat{\lambda}] - \lambda$ 。

习题 6.8. 日内瓦的出租车牌照号是从 1 一直到总数目 N_{taxi} 。对牌照的 N 次观测得到观测数字 n_1, \dots, n_N 。

(a) 构造出租车总数目的最大似然估计量。(这是最大似然估计量有偏并且无效的常见例子。困难的根源在于数据的边界依赖于参数。)

(b) 提出出租车数目更好的估计量并给出均值和方差。

习题 6.9. 考虑 N 个独立的泊松变量 n_1, \dots, n_N , 均值为 ν_1, \dots, ν_N 。假设均值依赖于某可控变量 x

$$\nu(x) = \theta a(x), \quad (6.13)$$

其中 θ 为未知参数, $a(x)$ 为任意已知函数。 N 个 ν_i 因而可以由 $\nu(x_i) = \theta a(x_i)$ 给出, 其中假设 x_1, \dots, x_N 已知。证明 θ 的最大似然估计量为

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{\sum_{i=1}^N a(x_i)}. \quad (6.14)$$

证明 $\hat{\theta}$ 为无偏的, 并且其方差有最小方差边界给出 (参见习题 6.6)。

习题 6.10. 习题 6.9 描述的状况的例子之一为 (反) 中微子-核子散射。根据夸克-部分子模型, 反应 $\nu N \rightarrow \mu^- X$ 和 $\bar{\nu} N \rightarrow \mu^+ X$ 的截面为

$$\begin{aligned} \sigma(\nu N \rightarrow \mu^- X) &= \frac{G^2 M E}{\pi} \left(\langle q \rangle + \frac{1}{3} \langle \bar{q} \rangle \right) \equiv \theta_\nu E \\ \sigma(\bar{\nu} N \rightarrow \mu^+ X) &= \frac{G^2 M E}{\pi} \left(\frac{1}{3} \langle q \rangle + \langle \bar{q} \rangle \right) \equiv \theta_{\bar{\nu}} E \end{aligned} \quad (6.15)$$

其中 E 为入射 (反) 中微子的能量, $M = 0.938 \text{ GeV}$ 为靶核子的质量, $G = 1.16 \times 10^{-6} \text{ GeV}^{-2}$ 为费米常数。(取自然单位制 $c = 1$ 。) 这里变量 x 对应于能量 E , 式 (6.15) 右端的参数对应两个不同的参数 θ_ν 和 $\theta_{\bar{\nu}}$ 。

假设在 N 个不同能量值处收集了数据。每个能量点, 事例数的期待值为

$$\nu_i = \sigma(E_i) \epsilon(E_i) \mathcal{L}_i, \quad (6.16)$$

其中 $\sigma(E_i)$ 为 (反) 中微子在能量为 E_i 时的截面, \mathcal{L}_i 为积分亮度, $\epsilon(E_i)$ 为记录事例的概率 (效率), 效率通常为能量的函数。出于本习题的目的, 我们假设能量 E_i , 积分亮度 \mathcal{L}_i 以及效率 $\epsilon(E_i)$ 精确已知没有不确定度。(再假设没有本底事例。) 确定参数 θ_ν 和 $\theta_{\bar{\nu}}$ 的最大似然估计量, 并据此求 $\langle q \rangle$ 和 $\langle \bar{q} \rangle$ 的估计量。在夸克-部分子模型中, 它们分别对应夸克和反夸克携带的动量占核子动量的份额。确定除了正反夸克外其它粒子 (即, 胶子) 携带的动量份额 $\langle g \rangle = 1 - \langle q \rangle - \langle \bar{q} \rangle$ 。

习题 6.11. 确定阿伏伽德罗常数的最早实验之一是基于布朗运动, 实验装置如图 6.1 所示。Jean Perrin¹ 用该装置观测悬浮在水中的乳香 (一种抛光材料) 颗粒。

¹ Jean Perrin, Mouvement brownien et réalité moléculaire, *Ann. Chimie et Physique*, 8^e série, **18**(1909)1-114; *Les Atomes*, Flammarion, Paris, 1991 (first edition, 1913); *Brownian Movement and Molecular Reality*, in Mary-Jo Nye, ed., *The Question of the Atom*, Tomash, Los Angeles, 1984.

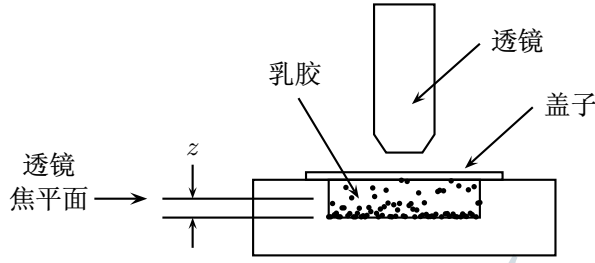


图 6.1: Jean Perrin 的实验装置，用于观测悬浮在水中的粒子数作为高度的函数。

粒子为半径 $r = 0.52 \mu\text{m}$ 的球状颗粒，密度为 1.063 g/cm^3 ，即，比水的密度大 0.063 g/cm^3 。在显微镜中观测这些颗粒，只有大约 $1 \mu\text{m}$ 的一层在聚焦范围内，范围之外的粒子观测不到。通过调节显微镜的透镜，焦平面可以垂直移动。在 4 个不同高度 z 处拍摄了照片，(最低高度任意设为 $z = 0$)，并数出不同 z 处的粒子数 $n(z)$ 。数据如表 6.1 所示。

高度 $z(\mu\text{m})$	粒子数 n
0	1880
6	940
12	530
18	305

表 6.1: Perrin 观测的数据，乳剂中不同高度 z 处乳香粒子的数目。

水中球状乳香粒子的引力势能为

$$E = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta \rho g z, \quad (6.17)$$

其中 $\Delta \rho = \rho_{\text{乳香}} - \rho_{\text{水}} = 0.063 \text{ g/cm}^3$ 为密度差， $g = 980 \text{ cm/s}^2$ 为重力加速度。统计力学预言，粒子处在能量为 E 的态的概率正比于

$$P(E) \propto e^{-E/kT}, \quad (6.18)$$

其中 k 为 Boltzmann 常数， T 为绝对温度。因此，粒子数作为高度的函数服从指数规律，其中在 z 处观测到的粒子数 n 可以看作均值为 $\nu(z)$ 的泊松变量。结合式 (6.17) 和 (6.18) 得到

$$\nu(z) = \nu_0 \exp\left(-\frac{4\pi r^3 \Delta \rho g z}{3kT}\right), \quad (6.19)$$

其中 ν_0 为 $z = 0$ 时粒子数的期待值。

(a) 写程序用最大似然法计算参数 k 和 ν_0 。利用表 6.1 中的数据按照泊松概率构造最大似然函数 (参见《统计数据分析》6.10 节)，

$$\log L(\nu_0, k) = \sum_{i=1}^N (n_i \log \nu_i - \nu_i), \quad (6.20)$$

其中 $N = 4$ 为测量次数。温度取 $T = 293 \text{ K}$ 。

(b) 利用得到的 k ，通过下面的关系计算阿伏伽德罗常数

$$N_A = R/k, \quad (6.21)$$

其中 R 为气体常数。Perrin 计算时取值为 $R = 8.32 \times 10^7 \text{ erg/mol K}$ 。

(c) 不求解对数似然函数 (6.20) 的最大值，而是通过最小化

$$\chi_{\text{P}}^2(\nu_0, k) = 2 \sum_{i=1}^N \left(n_i \log \frac{n_i}{\nu_i} + \nu_i - n_i \right), \quad (6.22)$$

其中 $\nu_i = \nu(z_i)$ 通过式 (6.19) 依赖于 ν_0 和 k 。利用 χ_{P}^2 的值计算拟合优度 (参见《统计数据分析》6.11 节)。讨论 Perrin 测量 N_A 中可能的系统不确定度。

第七章 最小二乘法

习题 7.1. *Galileo* 研究运动的实验之一是“小球和斜坡”的实验。在离开斜坡边缘之前，小球的轨迹变成水平，如图 7.1 所示。对于不同的高度 h ，测量从斜坡边缘到落地点的水平距离 d 。1608 年，*Galileo* 测量了 5 组数据，如表 7.1 所示¹。假设高度 h 的误差可以忽略，水平距离 d 可以看做独立的标准差 $\sigma = 15$ punti 的高斯

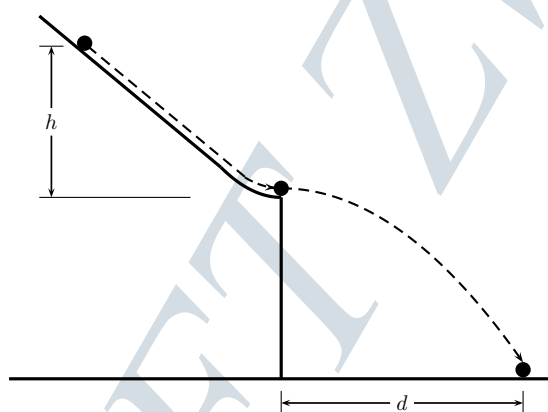


图 7.1: *Galileo* 小球和斜坡实验的示意图。

h	d
1000	1500
828	1340
800	1328
600	1172
300	800

表 7.1: *Galileo* 斜坡实验的 5 组数据。给定初始高度 h ， d 为落地前的水平距离。单位为 punti，1 punto \simeq 1 mm。

随机变量。（实际上我们不清楚 *Galileo* 如何估计测量误差，但是 1 – 2% 的误差是可以接受的。）此外，我们知道如果 $h = 0$ ，则水平距离 d 将为零，即，如果球从斜坡边缘出发，它将垂直落到地上。

(a) 考虑 h 和 d 的关系为如下形式

$$d = \alpha h \quad (7.1)$$

¹参见 Stillman Drake and Maclachlan, *Galileo's discovery of the parabolic trajectory*, *Scientific American* **232** (March 1975) 102; Stillman Drake, *Galileo at Work*, University of Chicago Press, Chicago (1978).

以及

$$d = \alpha h + \beta h^2. \quad (7.2)$$

求参数 α 和 β 的最小二乘估计量。对应于这两个假设的最小 χ^2 和 P -值分别为多少?

(b) 假设 d 和 h 的关系为如下形式

$$d = \alpha h^\beta. \quad (7.3)$$

写一段程序对 α 和 β 进行最小二乘拟合。注意这是参数的非线性函数，必须数值求解。

(c) Galileo 认为运动是水平分量和垂直分量的叠加，其中水平运动是匀速运动，垂直速度在斜坡的最低处为零，随后随时间线性增加。证明这将导致关系式

$$d = \alpha \sqrt{h}. \quad (7.4)$$

求 α 的最小二乘估计量以及最小 χ^2 。该假设的 P -值是多少?

习题 7.2. 考虑对直方图的最小二乘拟合。直方图对应区间 $i = 1, \dots, N$ 的事例数为 y_i ，理论预言值为

$$\lambda_i(\theta) = n \int_{x_i^{\min}}^{x_i^{\max}} f(x; \theta) dx, \quad (7.5)$$

其中 $f(x; \theta)$ 依赖于未知参数 θ 。假设用参数 ν 代替总事例数 n ，并且该参数在最小化

$$\chi^2(\theta, \nu) = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - \lambda_i(\theta, \nu))^2}{\sigma_i^2} \quad (7.6)$$

时与其它参数同时调整。

(a) 证明如果 $\sigma_i^2 = \lambda_i$ 则总事例数的估计量为

$$\hat{\nu}_{LS} = n + \frac{\chi_{\min}^2}{2} \quad (7.7)$$

(b) 证明如果 $\sigma_i^2 = y_i$ (修正后的最小二乘)，则估计量为

$$\hat{\nu}_{MLS} = n - \chi_{\min}^2. \quad (7.8)$$

习题 7.3. 考虑对直方图的最小二乘拟合，第 i 个区间的事例数为 y_i ， $i = 1, \dots, N$ ，对应的期待值为 $\lambda_i(\theta)$ 。假设总事例数 n 可以看作常数，于是 y_i 为多项分布。

(a) 求协方差矩阵 $V_{ij} = \text{cov}[y_i, y_j]$ 。为什么该矩阵的逆不存在?

(b) 考虑只使用前 $N-1$ 个区间进行拟合。求协方差矩阵的逆，并证明这等价于对所有 N 个区间进行拟合但不考虑关联。

习题 7.4. 假设样本容量为 n ，得到的 n 个测量值为 y_1, \dots, y_n ，将用来对未知参数进行最小二乘拟合。如果测量是相关的，需要用到协方差矩阵的逆 V^{-1} 来构造 χ^2 。一般先通过某种办法，比如蒙特卡罗计算，确定关联系数矩阵， $\rho_{ij} = V_{ij}/(\sigma_i \sigma_j)$ ，然后再确定协方差矩阵的逆。

(a) 注意到对于有效估计量，协方差矩阵的逆正比于样本容量 n 。证明在此条件下，关联系数矩阵与样本空间的大小无关。

(b) 证明协方差矩阵的逆为

$$(V^{-1})_{ij} = \frac{(\rho^{-1})_{ij}}{\sigma_i \sigma_j} \quad (7.9)$$

(提示：从下面等式出发

$$\delta_{ij} = \sum_k (V^{-1})_{ik} V_{kj} = \sum_k (V^{-1})_{ik} \rho_{kj} \sigma_k \sigma_j \quad (7.10)$$

对7.10式两边都乘以 ρ^{-1} ，并对适当的指标求和即可得到 7.9 式。)

习题 7.5. 考虑随机变量 x 的两个部分重叠的样本空间，其样本容量分别为 n 和 m ，共有部分为 c 。假设已知 x 的方差 $V[x] = \sigma^2$ 。考虑样本平均

$$y_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.11)$$

和

$$y_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i. \quad (7.12)$$

(a) 证明协方差为

$$\text{cov}[y_1, y_2] = \frac{c\sigma^2}{nm}. \quad (7.13)$$

(b) 利用 7.6 节的结果，求 y_1 和 y_2 的加权平均以及方差。

习题 7.6. 天文学家 *Claudius Ptolemy* 利用圆盘进行了光折射的实验，他把圆盘的一半浸入水中，圆心正好在水面处，如图 7.2 所示。大约公元 140 年，*Ptolemy* 对 8 组不同的入射角 θ_i 测量了折射角 θ_r ，结果如表 7.2

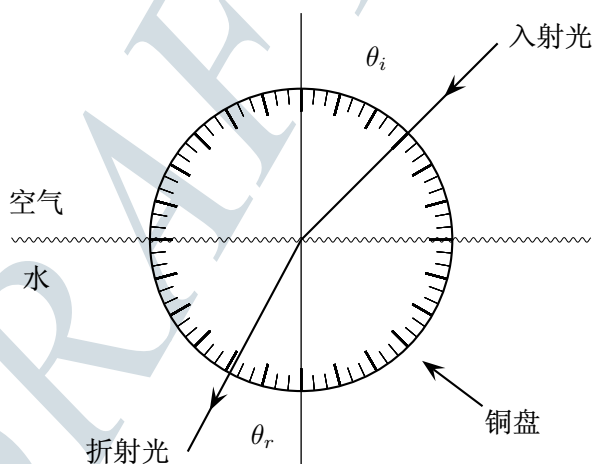


图 7.2: Ptolemy 用来研究光折射的设备。

所示²。本练习中，我们将认为入射角已知并且误差可以忽略，而将折射角看作标准差为 $\sigma = \frac{1}{2}^\circ$ 的高斯随机变量。(这是一个合理的假设，记录的角度精确到最邻近的半度。注意到我们可以将 θ_i 的误差吸收到 θ_r 的有效误差中。)

(a) 直到 17 世纪才发现正确的折射定律，在此之前，通常的假设是

$$\theta_r = \alpha \theta_i, \quad (7.14)$$

²取自 Pedersen and Mogens Pihl, *Early Physics and Astronomy: A Historical Introduction*, MacDonald and Janes, London, 1974

θ_i	θ_r
10	8
20	$15\frac{1}{2}$
30	$22\frac{1}{2}$
40	29
50	35
60	$40\frac{1}{2}$
70	$45\frac{1}{2}$
80	50

表 7.2: 入射角和折射角 (单位: 度)。

然而 *Ptolemy* 更喜欢用下面的形式

$$\theta_r = \alpha\theta_i - \beta\theta_i^2. \quad (7.15)$$

对两种不同的假设, 求参数的最小二乘估计量, 并计算最小 χ^2 值。评论一下两个假设的拟合优度。是否可以相信所有的数据都是从实际测量得来的?³

(b) 1621 年 *Snell* 发现了折射定律

$$\theta_r = \sin^{-1} \left(\frac{\sin \theta_i}{r} \right), \quad (7.16)$$

其中 $r = n_r/n_i$ 为两种介质折射率之比。求 r 的最小二乘估计量并计算出最小 χ^2 值。评价对 θ_r 进行 $\sigma = \frac{1}{2}^\circ$ 假设的合理性。

习题 7.7. 重新考虑练习 6.9: N 个独立的泊松变量 $\mathbf{n} = (n_1, \dots, n_N)$, 均值为 $\boldsymbol{\nu} = (\nu_1, \dots, \nu_N)$, 其中均值与某控制变量 x 有关,

$$\nu(x) = \theta a(x). \quad (7.17)$$

(a) 首先考虑最小二乘方法 (LS), χ^2 的分母使用 $\sigma_i^2 = \nu_i$ 。证明 θ 的最小二乘估计量为

$$\hat{\theta} = \left(\frac{\sum_{i=1}^N \frac{n_i^2}{a(x_i)}}{\sum_{i=1}^N a(x_i)} \right)^{1/2}. \quad (7.18)$$

通过对 $\hat{\theta}(\mathbf{n})$ 在 $\boldsymbol{\nu}$ 处进行泰勒展开至第二阶, 计算期待值, 证明 (7.18) 的偏置为

$$b = \frac{N-1}{2 \sum_{i=1}^N a(x_i)} + O(E[(n_i - \nu_i)^3]). \quad (7.19)$$

(利用独立泊松变量的协方差 $\text{cov}[n_i, n_j] = \delta_{ij}\nu_j$.)

(b) 取 χ^2 的分母为 $\sigma_i^2 = n_i$, 即把观测值作为方差, 用修正的最小二乘法 (MLS) 重复 (a) 中的步骤。证明 θ 的最小二乘估计量为

$$\hat{\theta} = \frac{\sum_{i=1}^N a(x_i)}{\sum_{i=1}^N \frac{a(x_i)^2}{n_i}}, \quad (7.20)$$

并且偏置为

$$b = -\frac{N-1}{\sum_{i=1}^N a(x_i)} + O(E[(n_i - \nu_i)^3]). \quad (7.21)$$

将 (a) 和 (b) 得到的偏置与习题 7.2 进行比较。

³ 参见 R. Feynman, R. Leighton and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. I, Addison-Wesley, Menlo Park, 1963, Section 26-2.

(c) 利用误差传递, 对 LS 和 MLS 两种情况估计 $\hat{\theta}$ 的方差。

注意, 由于习题 (6.9) 已经证明了 θ 的最大似然估计量是无偏的并且方差最小, 这里并不推荐最小二乘 (LS) 和修正的最小二乘 (MLS) 估计量。然而, 对于足够大的数据样本, 三个方法是类似的, 参见习题 (7.8)。

习题 7.8. 重新考虑 *Perrin* 关于乳香粒子作为高度的函数 (习题 6.11)。通过最小化

$$\chi^2(k, \nu_0) = \sum_{i=1}^N \frac{(n_i - \nu_i(k, \nu_0))^2}{\sigma_i^2}, \quad (7.22)$$

求玻尔兹曼常数 k (或者等价于阿伏伽德罗常数 $N_A = R/k$) 和系数 ν_0 的最小二乘估计量。

(a) 取 n_i 的标准差 σ_i 为 $\sqrt{\nu_i}$ (通常的最小二乘法)。

(b) 取 σ_i 为 $\sqrt{n_i}$ (修正的最小二乘法)。

将 (a) 和 (b) 得到的估计量与习题 (6.11) 中最大似然估计量进行比较。

第八章 矩方法

习题 8.1. 考虑服从高斯分布的随机变量 x ，均值 μ 和方差 σ^2 未知，并假设样本为 x_1, \dots, x_n 。

(a) 利用矩方法构造 μ 和 σ^2 的估计量。利用函数 $a_1 = x$ ， $a_2 = x^2$ ，使得期望值 $E[a_i(x)]$ 对应于 x 的一阶和二阶代数矩。

(b) 计算 (a) 中得到的估计量 $\hat{\mu}$ 与 $\hat{\sigma}^2$ 的期望值。这两个估计量是否是无偏的？

习题 8.2. 考虑粒子反应中产生的 ρ^0 介子衰变为两个带电 π 介子 ($\pi^+\pi^-$)。衰变角定义为，在 $\pi^+\pi^-$ 质心系中 π^+ 运动方向与 ρ 的原初方向的夹角，见图 (8.1)。由于 ρ^0 的自旋为 1， π 介子的自旋为 0，可以证明 $\cos \theta$

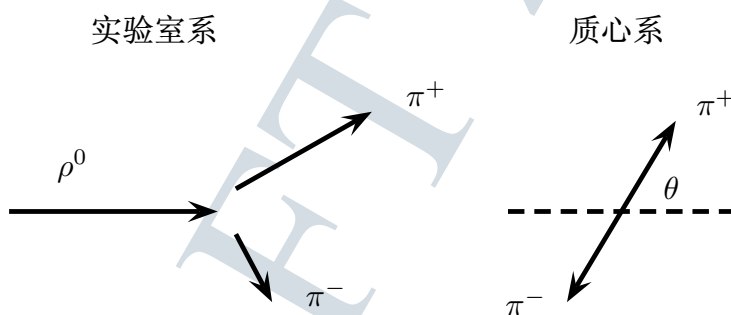


图 8.1: $\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 中衰变角的定义。

的分布具有如下形式

$$f(\cos \theta; \eta) = \frac{1}{2}(1 - \eta) + \frac{3}{2}\eta \cos^2 \theta, \quad (8.1)$$

其中自旋排列参数 η 的取值范围为 $-\frac{1}{2} \leq \eta \leq 1$ 。

(a) 假设某反应产生的 ρ^0 中，测量到 n 个 $\cos \theta$ 值。利用矩方法，取 $a = x^2$ ，构造自旋排列参数的估计量 $\hat{\eta}$ 。为什么不能用 $a = x$ 构造估计量？

(b) 计算 $\hat{\eta}$ 的期望值和方差。

第九章 统计误差、置信区间和极限

习题 9.1. 假设估计量 $\hat{\theta}$ 服从高斯分布，高斯分布的参数分别为 $\hat{\theta}$ 的真值 θ 和标准偏差 $\sigma_{\hat{\theta}}$ 。假设 $\sigma_{\hat{\theta}}$ 已知。

(a) 画出定义置信带的函数 $u_{\alpha}(\theta)$ 和 $v_{\beta}(\theta)$ (参见 *Statistical Data Analysis* 第 9.2 节)。

(b) 证明置信水平为 $1 - \gamma$ 时参数 θ 的中心置信区间由下式给出

$$[\hat{\theta} - \sigma_{\hat{\theta}}\phi^{-1}(1 - \gamma/2), \hat{\theta} + \sigma_{\hat{\theta}}\phi^{-1}(1 - \gamma/2)], \quad (9.1)$$

其中 ϕ^{-1} 是标准高斯分布的分位数。

习题 9.2. 随机变量 x 服从均值为 ξ 的指数分布，考虑对 x 的 n 次观测。参数 ξ 的最大似然估计量 (见 *Statistical Data Analysis* (6.6) 式) 由下式给出

$$\hat{\xi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (9.2)$$

并且 $\hat{\xi}$ 的概率密度函数 (参见 *Statistical Data Analysis* (10.25) 式) 为

$$g(\hat{\xi}; \xi) = \frac{n^n}{(n-1)!} \frac{\hat{\xi}^{n-1}}{\xi^n} e^{-n\hat{\xi}/\xi}. \quad (9.3)$$

(a) 证明：定义置信带的曲线 $u_{\alpha}(\xi)$ 和 $v_{\beta}(\xi)$ 为

$$\begin{aligned} u_{\alpha}(\xi) &= \frac{\xi}{2n} F_{\chi^2}^{-1}(1 - \alpha; 2n), \\ v_{\beta}(\xi) &= \frac{\xi}{2n} F_{\chi^2}^{-1}(\beta; 2n), \end{aligned} \quad (9.4)$$

其中 $F_{\chi^2}^{-1}$ 为 χ^2 分布的分位数。根据习题 2.6, χ^2 分布的累积分布可以与不完全伽马函数 $P(x, n)$ 联系起来：

$$F_{\chi^2}(2x; 2n) = P(x, n) \equiv \frac{1}{\Gamma(n)} \int_0^x e^{-t} t^{n-1} dt. \quad (9.5)$$

取 $\alpha = \beta = 0.159$, $n = 5$, 画出 $u_{\alpha}(\xi)$ 和 $v_{\beta}(\xi)$ 。(χ^2 分布的分位数可以从标准分布表中查出, 或者在 *ROOT* 中调用 `TMath::ChisquareQuantile(Double_t p, Double_t ndf)` 函数得到。)

(b) 求出置信区间 $[a, b]$ 作为估计值 $\hat{\xi}$ 、样本容量 n 以及置信水平 α 和 β 的函数。假设估计值为 $\hat{\xi} = 1.0$, 在 $u_{\alpha}(\xi)$ 和 $v_{\beta}(\xi)$ 的图上画出该估计量的值。取 $n = 5$, $\alpha = \beta = 0.159$, 计算 a 和 b 。将计算结果与估计值加減一倍标准差得到的区间进行比较。

习题 9.3. 证明二项分布的参数 p 的上限和下限为

$$\begin{aligned} p_{lo} &= \frac{nF_F^{-1}[\alpha; 2n, 2(N-n+1)]}{N-n+1+nF_F^{-1}[\alpha; 2n, 2(N-n+1)]} \\ p_{up} &= \frac{(n+1)F_F^{-1}[1-\beta; 2(n+1), 2(N-n)]}{(N-n)+(n+1)F_F^{-1}[1-\beta; 2(n+1), 2(N-n)]}. \end{aligned} \quad (9.6)$$

其中上下限的置信水平分别为 $1 - \alpha$ 和 $1 - \beta$, n 为 N 次试验中成功的次数, F_F^{-1} 为 F 分布的分位数, 由 F 分布定义:

$$f(x; n_1, n_2) = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{n_1/n_2} \frac{\Gamma(\frac{1}{2}(n_1 + n_2))}{\Gamma(\frac{1}{2}n_1)\Gamma(\frac{1}{2}n_2)} x^{n_1/2-1} \left(1 + \frac{n_1}{n_2}x\right)^{-(n_1+n_2)/2}, \quad (9.7)$$

其中 $x > 0$, 参数 n_1 和 n_2 为整数 (自由度)。利用二项分布累积分布函数与自由度为 $n_1 = 2(n+1)$ 和 $n_2 = 2(N-n)$ 的累积分布函数 $F_F(x)$ 的关系¹

$$\sum_{k=0}^n \frac{N!}{k!(N-k)!} p^k (1-p)^{N-k} = 1 - F_F\left[\frac{(N-n)p}{(n+1)(1-p)}; 2(n+1), 2(N-n)\right]. \quad (9.8)$$

F 分布的分位数可以从标准分布表中查得, 或者调用 *ROOT* 中的函数计算。

习题 9.4. 在 *CERN* 的 *Gargamelle* 气室中进行了反中微子-核子散射实验。选择的事例是只产生强子的事例 (通过中性流过程 $\bar{\nu}_\mu N \rightarrow \bar{\nu}_\mu X$), 或者是产生强子和一个 μ 子的事例 (通过带电流过程 $\bar{\nu}_\mu N \rightarrow \mu^+ X$)。从 212 个事例样本中, 64 个事例归类为中性流 (NC) 过程, 148 个归类为带电流 (CC) 过程。估计事例为中性流 (NC) 的概率, 并求出 68.3% 的中心置信区间。求 NC 与 CC 过程概率之比的估计量和置信区间。²

习题 9.5. 在研究粒子碰撞的实验中, 选择出来 10 个某种类型的事例, 比如说某个量 x 具有较高值的事例。这 10 个高 x 值的事例中, 发现有 2 个事例包含 μ 子。

(a) 高 x 值事例中包含 μ 子的事例数目服从二项分布, 求参数 p 的 68.3% 中心置信区间。将结果表示为 $p = \hat{p}_{-d}^{+c}$, 其中 \hat{p} 为 p 的最大似然估计, $[\hat{p}-c, \hat{p}+d]$ 为置信区间。

(b) 将 (a) 中的区间与 $\hat{p} \pm \hat{\sigma}_{\hat{p}}$ 进行比较, 其中 $\hat{\sigma}_{\hat{p}}$ 为 \hat{p} 的标准偏差的估计量。

(c) 经常犯的错误是将高 x 值的事例数 10 当作随机变量, 并将其方差引入 \hat{p} 的误差中 (例如通过误差传递)。为什么这种方法是不正确的?

习题 9.6. 假设为了产生习题 (9.5) 中的事例, 收集的总数据对应于积分亮度为 $L = 1 \text{ pb}^{-1}$ (误差可以忽略)。产生的给定类型事例总数可以看作均值为 $\nu = \sigma L$ 的泊松随机变量 n , 其中 σ 为产生截面。(为什么是泊松分布?)

(a) 对于高 x 值事例以及高 x 值的 μ 子事例, 假设观测到的事例数分别为 $n_x = 10$ 和 $n_{x\mu} = 2$, 求事例数期待值 ν_x 和 $\nu_{x\mu}$ 的 68.3% 中心置信区间。对应的产生截面 σ_x 和 $\sigma_{x\mu}$ 的置信区间为多少?

(b) 将 (a) 中得到的置信区间与通过加减一倍标准偏差得到的区间进行比较。

(c) 假设另外一个实验的积分亮度为 $L' = 100 \text{ pb}^{-1}$, 观测到 n'_x 个高 x 值的事例。但是这个实验不能鉴别 μ 子。利用数据 n_x , $n_{x\mu}$ 和 n'_x 构造参数 σ_x 和 $\sigma_{x\mu}/\sigma_x$ 的对数似然函数。证明 p 的最大似然估计量与 n'_x 无关。这是否说明第二个实验的结果对 p 的估计没有影响?

(d) 假设最初的实验没有测量高 x 值的事例数, 只是测得了包含 μ 子的高 x 值事例数。利用结果 $n_{x\mu} = 2$ 和 n'_x , 构造 σ_x 和 p 的对数似然函数, 并求出最大似然估计量。利用误差传递估计 \hat{p} 的标准偏差, 并比较区间 $\hat{p} \pm \hat{\sigma}_{\hat{p}}$ 与习题 (9.5) 中 (a) 和 (b) 得到的区间。选作: 这种情况下, 如何构造 p 的置信区间?

习题 9.7. 相互作用中产生的某粒子以相对于 z 的某一角度发射出来, 如图 9.1 所示。探测器放在距离相互作用顶点为 d 处测量粒子垂直于 z 方向的位置 x 。角度 θ 定义为 z 轴与粒子径迹在 (x, z) 平面上投影的夹角。假设测量值 x 可以看做以真值为中心值, 标准偏差为 σ_x 的高斯变量。

¹ 利用 F 分布计算二项分布的置信区间是 A. Hald 提出来的, 见 *Statistical Theory with Engineering Applications*, John Wiley, New York, 1952.

² 实际实验中还考虑了小本底的修正, 参见 F.J. Hasert et al., Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment. *Phys. Lett.* **46B**(1973) 138.

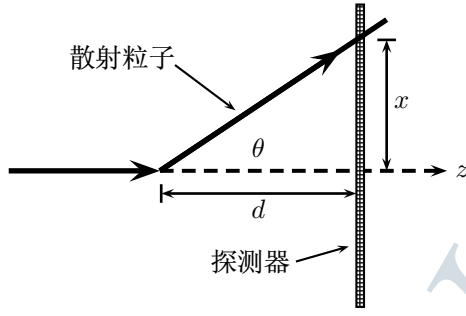


图 9.1: 粒子径迹投影到 (x, z) 平面上的散射角 θ 的定义。

(a) 求 $\cos \theta$ 置信水平为 $1 - \gamma$ 的中心置信区间。

(b) 取 $d = 1\text{m}$, $\sigma_x = 1\text{mm}$, 并假设测量值为 $x = 2.0\text{mm}$ 。求 $\cos \theta$ 置信水平分别为 68.3% 和 95% 的中心置信区间。

第十章 特征函数

习题 10.1. 证明高斯分布

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10.1)$$

的特征函数为

$$\phi(k) = \exp(i\mu k - \frac{1}{2}\sigma^2 k^2). \quad (10.2)$$

习题 10.2. 证明指数分布

$$f(x; \xi) = \frac{1}{\xi} e^{-x/\xi} \quad (10.3)$$

的特征函数为

$$\phi(k) = \frac{1}{1 - ik\xi}. \quad (10.4)$$

习题 10.3. 证明自由度为 n 的 χ^2 分布

$$f(z; n) = \frac{1}{2^{n/2}\Gamma(n/2)} z^{n/2-1} e^{-z/2} \quad (10.5)$$

的特征函数为

$$\phi(k) = (1 - 2ik)^{-n/2}. \quad (10.6)$$

证明中需要伽马函数的定义

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt. \quad (10.7)$$

习题 10.4. 假设随机变量 x_1, \dots, x_n 是独立的, 并且都服从均值为 μ , 方差为 σ^2 的高斯分布。第 5 章和第 6 章给出, 可以用样本平均

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10.8)$$

作为均值 μ 的估计量。

(a) 求样本平均的特征函数。

(b) 利用特征函数证明 \bar{x} 本身服从高斯分布, 并求其均值和方差。

习题 10.5. 利用特征函数, 证明高斯分布的前 4 阶代数矩为

$$\begin{aligned} E[x] &= \mu \\ E[x^2] &= \mu^2 + \sigma^2 \\ E[x^3] &= \mu^3 + 3\mu\sigma^2 \\ E[x^4] &= 3(\mu^2 + \sigma^2)^2 - 2\mu^4. \end{aligned} \quad (10.9)$$

习题 10.6.

(a) 利用特征函数, 证明自由度为 n 的 χ^2 分布的均值和方差分别为 n 和 $2n$ 。

(b) 假设 z 服从自由度为 n 的 χ^2 分布。证明在大 n 极限下, χ^2 分布变为高斯分布, 并且均值 $\mu = n$, 方差 $\sigma^2 = 2n$ 。证明中需要定义变量

$$y = \frac{z - n}{\sqrt{2n}}, \quad (10.10)$$

y 的均值为零, 标准偏差为 1。证明 y 的特征函数为

$$\phi_y(k) = e^{-ik\sqrt{n/2}}\phi_z\left(\frac{k}{\sqrt{2n}}\right). \quad (10.11)$$

将 $\phi_y(k)$ 的对数展开, 并只保留大 n 极限下不消失的项。再变换回变量 z 得到要证明的结果。

习题 10.7. 假设 n 个独立的随机变量 x_1, \dots, x_n 都服从标准高斯分布, 即对所有 $i = 1, \dots, n$,

$$\varphi(x_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{-x_i^2/2}. \quad (10.12)$$

考虑变量

$$y = \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)^{1/2}. \quad (10.13)$$

(a) 首先只考虑某一个 x_i 。通过变量变换, 证明 $u = x_i^2$ 的概率密度函数为

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi u}}e^{-u/2}. \quad (10.14)$$

这是自由度为 1 的 χ^2 分布。

(b) 证明 u 的特征函数为

$$\phi_u(k) = \frac{1}{\sqrt{1 - 2ik}}. \quad (10.15)$$

(c) 利用相加定理, 求下面变量的特征函数

$$v = \sum_{i=1}^n x_i^2. \quad (10.16)$$

(d) 利用变量变换, 证明 $y = (\sum_{i=1}^n x_i^2)^{1/2}$ 的概率密度函数为

$$h(y) = \frac{1}{2^{n/2-1}\Gamma(n/2)}y^{n-1}e^{-y^2/2}. \quad (10.17)$$

(e) 写出 $n = 3$ 时的概率密度函数。这是 *Maxwell-Boltzmann* 分布。假设气体中分子的速度分量 v_x , v_y 和 v_z 都是均值为零, 标准偏差为 σ 的高斯变量。写出分子速度 $v = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)^{1/2}$ 的概率密度函数。

(f) 写出 $n = 1$ 时的概率密度函数。即, 如果 x 服从标准高斯分布, $y = |x|$ 的概率密度函数是什么?

习题 10.8. 考虑服从柯西分布的随机变量 x ,

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{1 + x^2}. \quad (10.18)$$

(a) 证明其特征函数为

$$\phi(k) = e^{-|k|}. \quad (10.19)$$

(利用留数定理, $k > 0$ 时选取上半平面的路径, $k < 0$ 时选取下半平面的路径。)

(b) 考虑柯西随机变量 x 容量为 n 的样本。利用 (a) 中得到的特征函数并应用相加定理，证明样本平均 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 也服从柯西分布。这是一个特例，即 \bar{x} 的概率密度函数不随样本容量的增加而改变，与柯西分布的各阶矩不存在有关。

习题 10.9. 狄拉克 δ 函数

$$f(x; \mu) = \delta(x - \mu) \quad (10.20)$$

定义为

$$\begin{aligned} \delta(x - \mu) &= 0, x \neq \mu, \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x - \mu) dx &= 1. \end{aligned} \quad (10.21)$$

即， $\delta(x - \mu)$ 在 $x = \mu$ 处为无限尖锐的峰，但在其它地方都等于零。求 $\delta(x - \mu)$ 的特征函数，并据此得到 δ 函数的积分表示。