

实验：从样本空间到随机变量 —— 用 Python 理解概率与分布（基于掷两枚骰子）

- 样本空间
- 事件与概率
- 加法法则 (sum rule)
- 乘法法则 (product rule)
- 随机变量与分布
- 条件概率
- 频率逼近概率 (频率学派思想)
- 机器学习中的 $p(y|x)$ 视角

实验目标

1. 用一个简单的“两骰实验”理解概率空间 (Ω, \mathcal{F}, P) 的含义。
2. 通过枚举与模拟，观察“客观频率”如何逼近理论概率。
3. 定义随机变量 X 并估计其分布。
4. 计算条件概率并验证乘法法则。
5. 通过小例子理解“机器学习本质上在学习 $p(y|x)$ ”。

0. 导入依赖

```
In [ ]: import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from collections import Counter
```

1 样本空间 Ω 、事件与理论概率（枚举实现）

定义样本空间：掷两枚骰子

样本空间：

$$\Omega = \{(d_1, d_2) : d_1, d_2 \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}\}$$

```
In [ ]: # 构造样本空间（36种结果）
Omega = [(d1, d2) for d1 in range(1,7) for d2 in range(1,7)]
len(Omega), Omega[:5]
```

定义三个事件

- **A**: 点数之和为 7

- **B**: 至少一个骰子为 6
- **C**: 点数之和为偶数

```
In [ ]: # 定义事件
# A =
# B =
# C =

# 理论概率 = 事件大小 / 样本空间大小
def P_theory(event):
    return len(event) / len(Omega)

P_A, P_B, P_C = P_theory(A), P_theory(B), P_theory(C)
P_A, P_B, P_C
```

验证加法法则 (sum rule)

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

```
In [ ]: A_set = set(A)
B_set = set(B)

# A_or_B =
# A_and_B =

#lhs =
#rhs =
lhs, rhs
```

若两者相等，说明加法法则成立。

2 用模拟验证“频率逼近概率”

讲义讲到：**频率主义**认为概率是“重复实验中的长期频率”。

我们用 N 次模拟来验证。

```
In [ ]: def simulate_once():
    return np.random.randint(1,7), np.random.randint(1,7)

def estimate_probabilities(N):
    samples = [simulate_once() for _ in range(N)]

    # freq_A =
    # freq_B =
    # freq_C =
    return freq_A, freq_B, freq_C

for N in [100, 1000, 10000]:
    print(N, estimate_probabilities(N))
```

观察：随着样本量增加，模拟频率逐渐接近理论概率。

3 随机变量 X = 两骰点数之和的分布

前 20 页强调：随机变量是一个映射：

$$X: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$$

这里定义随机变量：

$$X(\omega) = D_1 + D_2$$

3.1 用模拟估计 X 的分布

```
In [ ]: N = 20000
samples = [simulate_once() for _ in range(N)]

X = [d1+d2 for (d1,d2) in samples]
cnt = Counter(X)

xs = sorted(cnt.keys())
pmf_empirical = [cnt[k]/N for k in xs]

plt.figure(figsize=(7,4))
plt.bar(xs, pmf_empirical)
plt.xlabel("X = d1 + d2")
plt.ylabel("Empirical Probability")
plt.title("Empirical Distribution of X")
plt.show()
```

可以看到典型的“三角形”分布：中间的和值更大。

3.2 理论分布（通过枚举计算）

```
In [ ]: #cnt_theory =
#pmf_theory = [cnt_theory[k]/36 for k in xs]

plt.figure(figsize=(7,4))
plt.plot(xs, pmf_theory, marker='o', label="Theory")
plt.plot(xs, pmf_empirical, marker='x', label="Simulation")
plt.xlabel("X")
plt.ylabel("Probability")
plt.title("Theory vs Simulation")
plt.legend()
plt.show()
```

你会看到：随着样本量增大，模拟分布逼近理论概率。

条件概率与乘法法则（product rule）

前 20 页提到:

$$P(A \cap B) = P(A | B) P(B)$$

我们用以下事件:

- A : 两骰点数之和 ≥ 9
- B : 第一枚骰子 $= 6$

4.1 用模拟估计三种概率

```
In [ ]: A = lambda w: (w[0] + w[1]) >= 9
B = lambda w: (w[0] == 6)

N = 20000
samples = [simulate_once() for _ in range(N)]

# P_A =
# P_B =
# P_A_and_B =
# P_A_given_B =

P_A, P_B, P_A_and_B, P_A_given_B
```

4.2 检验乘法法则

```
In [ ]: print("LHS = P(A∩B) =", P_A_and_B)
print("RHS = P(A|B) * P(B) =", P_A_given_B * P_B)
```

若接近, 则说明模拟验证了乘法法则。

5 机器学习视角: 学习 $p(y|x)$ 的简单演示

前 20 页讲到机器学习的本质是学习条件分布:

$$y \sim p(y | x)$$

我们构造一个非常简单的例子:

- $x = 0$ 表示“不下雨”
- $x = 1$ 表示“下雨”
- $y = 1$ 表示“带伞”

人为设定:

$$P(y = 1 | x = 0) = 0.2, \quad P(y = 1 | x = 1) = 0.9$$

5.1 随机生成数据

```
In [ ]: def sample_xy(N=2000):
    xs = np.random.randint(0,2,size=N)
    ys = []
    for x in xs:
        if x == 0:
            ys.append(np.random.rand() < 0.2)
        else:
            ys.append(np.random.rand() < 0.9)
    return np.array(xs), np.array(ys)

xs, ys = sample_xy()

# 经验估计  $p(y/x)$ 
p_y1_x0 = ys[xs==0].mean()
p_y1_x1 = ys[xs==1].mean()
p_y1_x0, p_y1_x1
```

输出应接近什么值？

这说明：通过数据估计条件概率，就是机器学习的最基本形式。

贝叶斯实验：基于医疗检测数据的先验-后验分析

本实验通过一个简化的**医疗检测场景**，用 Python 完成一次完整的贝叶斯分析，重点理解：

- 先验概率 (prior)
- 似然 (likelihood)
- 后验概率 (posterior)
- 基准率 (base rate)
- 信息更新 $P(D | T)$
- 同一检测在不同人群中的差异

记号说明：

- D ：是否患病 ($D = 1$ 患病, $D = 0$ 不患病)
- T ：检测结果 ($T = 1$ 阳性, $T = 0$ 阴性)

```
In [ ]: # 0. 导入依赖
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

# 为了实验可重复
np.random.seed(42)
```

生成一份“模拟真实”的医疗检测数据

我们假设**自己是上帝，主宰一切**因此可以设定：

- 总样本量 $N = 400$
- 真正的患病率（总体层面）为 $P(D = 1) = 0.1$
- 检测方法的灵敏度（敏感度）为 $P(T = 1 | D = 1) = 0.9$
- 检测方法的特异度为 $P(T = 0 | D = 0) = 0.95$

生成数据步骤：

1. 按照患病率模拟每个人是否患病。
2. 对每个个体，根据其真实病情和检测性能（灵敏度、特异度），模拟检测结果。
3. 得到一个包含两列的数据集：
 - `disease` : 0/1
 - `test` : 0/1

In []:

```
# 1. 生成模拟数据

N = 400 # 样本量

# 真实参数（用于生成数据）
p_disease_true = 0.10 # 真正患病率 P(D=1)
sens_true = 0.90 # 灵敏度 P(T=1|D=1)
spec_true = 0.95 # 特异度 P(T=0|D=0)

# 1) 模拟是否患病
disease = (np.random.rand(N) < p_disease_true).astype(int) # 0/1

# 2) 模拟检测结果
test = np.zeros(N, dtype=int)

for i in range(N):
    if disease[i] == 1:
        # 患病者：以灵敏度为阳性概率
        test[i] = int(np.random.rand() < sens_true)
    else:
        # 未患病者：以假阳性率(1-spec_true)为阳性概率
        test[i] = int(np.random.rand() < (1 - spec_true))

# 3) 组装成 DataFrame
df = pd.DataFrame({
    "disease": disease,
    "test": test
})

df.head(100)
```

1 构造 2×2 混淆矩阵

记混淆矩阵为：

	$D = 1$ (患病)	$D = 0$ (不患病)
$T = 1$ (阳性)	a	b
$T = 0$ (阴性)	c	d

我们从数据中统计 a, b, c, d 。

```
In [ ]: # 2. 混淆矩阵统计

# 使用 pandas crosstab
ct = pd.crosstab(df["test"], df["disease"], rownames=["T"], colnames=["D"])
ct

# 为了后续方便，取出  $a, b, c, d$ 
# 按照表格定义：
#  $a = T=1$  且  $D=1$ 
#  $b = T=1$  且  $D=0$ 
#  $c = T=0$  且  $D=1$ 
#  $d = T=0$  且  $D=0$ 

#  $a =$ 
#  $b =$ 
#  $c =$ 
#  $d =$ 

N_check = a + b + c + d

a, b, c, d, N_check
```

1.1 用频率估计基础概率

根据混淆矩阵，估计下面这些量：

- 患病率（先验的频率估计）：

$$\hat{P}(D = 1) = \frac{a + c}{a + b + c + d}$$

- 灵敏度（敏感度）：

$$\hat{P}(T = 1 \mid D = 1) = \frac{a}{a + c}$$

- 特异度：

$$\hat{P}(T = 0 \mid D = 0) = \frac{d}{b + d}$$

- 假阳性率：

$$\hat{P}(T = 1 \mid D = 0) = \frac{b}{b + d}$$

- 直接从数据估计的后验：

$$\hat{P}(D = 1 \mid T = 1) = \frac{a}{a + b}$$

```
In [ ]: # 3. 频率估计

# p_D1_hat =          # 患病率
# p_T1_given_D1_hat = # 灵敏度
# p_T0_given_D0_hat = # 特异度
# p_T1_given_D0_hat = # 假阳性率
# p_D1_given_T1_freq = # 条件频率

p_D1_hat, p_T1_given_D1_hat, p_T0_given_D0_hat, p_T1_given_D0_hat, p_D1_given_T1_freq
```

可以在 Notebook 中打印并解释这些值，例如：

- $\hat{P}(D = 1)$ 是否接近我们生成数据时设定的 0.1?
- $\hat{P}(T = 1 \mid D = 1)$ 是否接近 0.9?
- $\hat{P}(T = 0 \mid D = 0)$ 是否接近 0.95?

这说明：**频率估计在样本量足够大时，会接近真实参数。**

```
In [ ]: print(f"样本估计患病率 P(D=1) ≈ {p_D1_hat:.3f}")
print(f"样本估计灵敏度 P(T=1|D=1) ≈ {p_T1_given_D1_hat:.3f}")
print(f"样本估计特异度 P(T=0|D=0) ≈ {p_T0_given_D0_hat:.3f}")
print(f"样本估计假阳性率 P(T=1|D=0) ≈ {p_T1_given_D0_hat:.3f}")
print(f"直接条件频率 P(D=1|T=1) ≈ {p_D1_given_T1_freq:.3f}")
```

2 使用贝叶斯公式计算后验概率

贝叶斯公式：

$$P(D = 1 \mid T = 1) = \frac{P(T = 1 \mid D = 1) P(D = 1)}{P(T = 1)}.$$

其中：

- $P(D = 1)$: 先验
- $P(T = 1 \mid D = 1)$: 灵敏度
- $P(T = 1 \mid D = 0)$: 假阳性率
- $P(T = 1)$: 边缘概率

我们先用**样本频率**作为先验和似然，然后用贝叶斯公式算一次后验，看看与“直接条件频率”有多接近。

```
In [ ]: # 4. 使用样本频率作为输入，做一次贝叶斯更新

# 将频率估计作为“参数”
P_D1 = p_D1_hat
P_D0 = 1 - P_D1

P_T1_given_D1 = p_T1_given_D1_hat
P_T1_given_D0 = p_T1_given_D0_hat

# 边缘概率 P(T=1)
#P_T1 =
```



```
# 贝叶斯后验  $P(D=1|T=1)$ 
#  $P_{D1\_given\_T1\_bayes}$  =

P_T1, P_D1_given_T1_bayes
```

对比：

- 直接条件频率（纯频率学派视角）：

$$\hat{P}(D = 1 | T = 1) = \frac{a}{a + b}$$

- 贝叶斯公式（频率估计作为“参数”）得到的后验：

$$P(D = 1 | T = 1)_{\text{Bayes}} = \frac{P(T = 1 | D = 1) P(D = 1)}{P(T = 1)}$$

在大样本下，两者应当非常接近。

```
In [ ]: print(f"直接条件频率  $P(D=1|T=1)$  ≈ {p_D1_given_T1_freq:.4f}")
print(f"贝叶斯公式计算的  $P(D=1|T=1)$  ≈ {P_D1_given_T1_bayes:.4f}")
```

3 改变先验：普通人群 vs 高危人群

现在我们不再把先验 $P(D = 1)$ 固定为样本患病率，而是假设：

- 场景 A（普通人群）： $P(D = 1) = 0.01$
- 场景 B（高危人群）： $P(D = 1) = 0.20$

仍然使用刚才样本估计的灵敏度与假阳性率：

- $P(T = 1 | D = 1) \approx \hat{P}(T = 1 | D = 1)$
- $P(T = 1 | D = 0) \approx \hat{P}(T = 1 | D = 0)$

对于每个场景计算：

$$P(T = 1) = P(T = 1 | D = 1)P(D = 1) + P(T = 1 | D = 0)P(D = 0),$$

$$P(D = 1 | T = 1) = \frac{P(T = 1 | D = 1)P(D = 1)}{P(T = 1)}.$$

```
In [ ]: # 5. 不同先验下的贝叶斯后验

# 使用样本估计的检测性能
P_T1_D1 = p_T1_given_D1_hat
P_T1_D0 = p_T1_given_D0_hat

def posterior_with_prior(prior_D1):
    prior_D0 = 1 - prior_D1
    P_T1 = P_T1_D1 * prior_D1 + P_T1_D0 * prior_D0
    P_D1_T1 = (P_T1_D1 * prior_D1) / P_T1
    return P_T1, P_D1_T1
```

```
# 场景 A: 普通人群
prior_A = 0.01
# P_T1_A, P_D1_T1_A = posterior_with_prior(prior_A)

# 场景 B: 高危人群
prior_B = 0.20
# P_T1_B, P_D1_T1_B =

P_T1_A, P_D1_T1_A, P_T1_B, P_D1_T1_B
```

打印结果，并比较两个场景下 $P(D = 1 \mid T = 1)$ 的区别。

```
In [ ]: print("=== 场景 A: 普通人群（先验 P(D=1)=0.01） ===")
print(f"P(T=1) ≈ {P_T1_A:.4f}")
print(f"P(D=1|T=1) ≈ {P_D1_T1_A:.4f}")

print("\n=== 场景 B: 高危人群（先验 P(D=1)=0.20） ===")
print(f"P(T=1) ≈ {P_T1_B:.4f}")
print(f"P(D=1|T=1) ≈ {P_D1_T1_B:.4f}")
```

小结

- 同样的检测性能（灵敏度、特异度），在不同人群（先验不同）下，同样是阳性结果 $T = 1$ ，后验 $P(D = 1 \mid T = 1)$ 可以相差很大。
 - 这对应课堂上讲的“基准率”效应：
若忽略总体患病率（先验），只看到“检测很准”，容易高估阳性结果代表的“真的得病”的概率。
-