

EM 算法

1. 如果概率模型的变量都是观测变量，则给定数据之后，可以直接用极大似然估计法或者贝叶斯估计法来估计模型参数。

但是当模型含有隐变量时，就不能简单的使用这些估计方法。此时需要使用 EM 算法。

- EM 算法是一种迭代算法。
 - EM 算法专门用于含有隐变量的概率模型参数的极大似然估计，或者极大后验概率估计。
2. EM 算法的每次迭代由两步组成：
 - E 步求期望。
 - M 步求极大。

所以 EM 算法也称为期望极大算法。

一、示例

1.1 身高抽样问题

1. 假设学校所有学生中，男生身高服从正态分布 $\mathcal{N}(\mu_1, \sigma_1^2)$ ，女生身高服从正态分布 $\mathcal{N}(\mu_2, \sigma_2^2)$ 。
现在随机抽取200名学生，得到这些学生的身高 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ，求参数 $\{\mu_1, \sigma_1^2, \mu_2, \sigma_2^2\}$ 的估计。

2. 定义隐变量为 z ，其取值为 $\{0, 1\}$ ，分别表示 男生、女生。

- 如果隐变量是已知的，即已知每个学生是男生还是女生 $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ ，则问题很好解决：

- 统计所有男生的身高的均值和方差，得到 $\{\mu_1, \sigma_1^2\}$ ：

$$\mu_1 = \text{avg}\{x_i \mid z_i = 0\} \quad \sigma_1^2 = \text{var}\{x_i \mid z_i = 0\}$$

其中 $\{x_i \mid z_i = 0\}$ 表示满足 $z_i = 0$ 的 x_i 构成的集合。avg, var 分别表示平均值和方差。

- 统计所有女生的身高的均值和方差，得到 $\{\mu_2, \sigma_2^2\}$ ：

$$\mu_2 = \text{avg}\{x_i \mid z_i = 1\} \quad \sigma_2^2 = \text{var}\{x_i \mid z_i = 1\}$$

其中 $\{x_i \mid z_i = 1\}$ 表示满足 $z_i = 1$ 的 x_i 构成的集合。avg, var 分别表示平均值和方差。

- 如果已知参数 $\{\mu_1, \sigma_1^2, \mu_2, \sigma_2^2\}$ ，则任意给出一个学生的身高 x ，可以知道该学生分别为男生/女生的概率。

$$p_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_1} \exp\left(-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right)$$
$$p_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_2} \exp\left(-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right)$$

则有： $p(z = 0 \mid x) = \frac{p_1}{p_1 + p_2}$, $p(z = 1 \mid x) = \frac{p_2}{p_1 + p_2}$ 。因此也就知道该学生更可能为男生，还是更可能为女生。

因此：参数 $\{\mu_1, \sigma_1^2, \mu_2, \sigma_2^2\} \Leftrightarrow$ 学生是男生/女生，这两个问题是相互依赖，相互纠缠的。

3. 为解决该问题，通常采取下面步骤：

- 先假定参数的初始值: $\{\mu_1^{<0>}, \sigma_1^{2<0>}, \mu_2^{<0>}, \sigma_2^{2<0>}\}$ 。
- 迭代: $i = 0, 1, \dots$
 - 根据 $\{\mu_1^{<i>}, \sigma_1^{2<i>}, \mu_2^{<i>}, \sigma_2^{2<i>}\}$ 来计算每个学生更可能是属于男生, 还是属于女生。
这一步为 **E** 步 (Expectation), 用于计算隐变量的后验分布 $p(z | x)$ 。
 - 根据上一步的划分, 统计所有男生的身高的均值和方差, 得到 $\{\mu_1^{<i+1>}, \sigma_1^{2<i+1>}\}$; 统计所有女生的身高的均值和方差, 得到 $\{\mu_2^{<i+1>}, \sigma_2^{2<i+1>}\}$ 。
这一步为 **M** 步 (Maximization), 用于通过最大似然函数求解正态分布的参数。
 - 当前后两次迭代的参数变化不大时, 迭代终止。

1.2 三硬币模型

- 已知三枚硬币 **A**, **B**, **C**, 这些硬币正面出现的概率分别为 π, p, q 。进行如下试验:
 - 先投掷硬币 **A**, 若是正面则选硬币 **B**; 若是反面则选硬币 **C**。
 - 然后投掷被选出来的硬币, 投掷的结果如果是正面则记作 **1**; 投掷的结果如果是反面则记作 **0**。
 - 独立重复地 N 次试验, 观测结果为: **1, 1, 0, 1, 0, ..., 0, 1**。

现在只能观测到投掷硬币的结果, 无法观测投掷硬币的过程, 求估计三硬币正面出现的概率。

- 设:
 - 随机变量 Y 是观测变量, 表示一次试验观察到的结果, 取值为 **1** 或者 **0**
 - 随机变量 Z 是隐变量, 表示未观测到的投掷 **A** 硬币的结果, 取值为 **1** 或者 **0**
 - $\theta = (\pi, p, q)$ 是模型参数

则:

$$\begin{aligned} P(Y; \theta) &= \sum_Z P(Y, Z; \theta) = \sum_Z P(Z; \theta) P(Y | Z; \theta) \\ &= \pi p^Y (1-p)^{1-Y} + (1-\pi) q^Y (1-q)^{1-Y} \end{aligned}$$

注意: 随机变量 Y 的数据可以观测, 随机变量 Z 的数据不可观测

- 将观测数据表示为 $\mathbb{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$, 未观测数据表示为 $\mathbb{Z} = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ 。

由于每次试验之间都是独立的, 则有:

$$P(\mathbb{Y}; \theta) = \prod_{j=1}^N P(Y = y_j; \theta) = \prod_{j=1}^N [\pi p^{y_j} (1-p)^{1-y_j} + (1-\pi) q^{y_j} (1-q)^{1-y_j}]$$

- 考虑求模型参数 $\theta = (\pi, p, q)$ 的极大似然估计, 即:

$$\hat{\theta} = \arg \max_{\theta} \log P(\mathbb{Y}; \theta)$$

这个问题没有解析解, 只有通过迭代的方法求解, **EM** 算法就是可以用于求解该问题的一种迭代算法。

- EM** 算法求解:

首先选取参数的初值, 记作 $\theta^{<0>} = (\pi^{<0>}, p^{<0>}, q^{<0>})$, 然后通过下面的步骤迭代计算参数的估计值, 直到收敛为止:

设第 i 次迭代参数的估计值为: $\theta^{<i>} = (\pi^{<i>}, p^{<i>}, q^{<i>})$, 则 **EM** 算法的第 $i+1$ 次迭代如下:

- **E** 步: 计算模型在参数 $\theta^{<i>} = (\pi^{<i>}, p^{<i>}, q^{<i>})$ 下, 观测数据 y_j 来自于投掷硬币 **B** 的概率:

$$\mu_j^{<i+1>} = \frac{\pi^{<i>} (p^{<i>})^{y_j} (1 - p^{<i>})^{1-y_j}}{\pi^{<i>} (p^{<i>})^{y_j} (1 - p^{<i>})^{1-y_j} + (1 - \pi^{<i>}) (q^{<i>})^{y_j} (1 - q^{<i>})^{1-y_j}}$$

它其实就是 $P(Z = 1 | Y = y_j)$ ，即：已知观测变量 $Y = y_j$ 的条件下，观测数据 y_j 来自于投掷硬币 B 的概率。

- M 步：计算模型参数的新估计值：

$$\begin{aligned}\pi^{<i+1>} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \mu_j^{<i+1>} \\ p^{<i+1>} &= \frac{\sum_{j=1}^N \mu_j^{<i+1>} y_j}{\sum_{j=1}^N \mu_j^{<i+1>}} \\ q^{<i+1>} &= \frac{\sum_{j=1}^N (1 - \mu_j^{<i+1>}) y_j}{\sum_{j=1}^N (1 - \mu_j^{<i+1>})}\end{aligned}$$

- 第一个式子：通过后验概率 $P(Z | Y)$ 估计值的均值作为先验概率 π 的估计。
- 第二个式子：通过条件概率 $P(Y | Z = 1)$ 的估计来求解先验概率 p 的估计。
- 第三个式子：通过条件概率 $P(Y | Z = 0)$ 的估计来求解先验概率 q 的估计。

6. EM 算法的解释：

- 初始化：随机选择三枚硬币 A, B, C 正面出现的概率 π, p, q 的初始值 $\pi^{<0>}, p^{<0>}, q^{<0>}$ 。
- E 步：在已知概率 π, p, q 的情况下，求出每个观测数据 y_j 是来自于投掷硬币 B 的概率。即： $p(z_j | y_j = 1)$ 。
- 于是对于 N 次实验，就知道哪些观测数据是由硬币 B 产生，哪些是由硬币 C 产生。
- M 步：在已知哪些观测数据是由硬币 B 产生，哪些是由硬币 C 产生的情况下：
 - π 就等于硬币 B 产生的次数的频率。
 - p 就等于硬币 B 产生的数据中，正面向上的频率。
 - q 就等于硬币 C 产生的数据中，正面向上的频率。

二、EM算法原理

2.1 观测变量和隐变量

1. 令 Y 表示观测随机变量， $\mathbb{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 表示对应的数据序列；令 Z 表示隐随机变量， $\mathbb{Z} = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ 表示对应的数据序列。
 \mathbb{Y} 和 \mathbb{Z} 连在一起称作完全数据，观测数据 \mathbb{Y} 又称作不完全数据。
2. 假设给定观测随机变量 Y ，其概率分布为 $P(Y; \theta)$ ，其中 θ 是需要估计的模型参数，则不完全数据 \mathbb{Y} 的似然函数是 $P(\mathbb{Y}; \theta)$ ，对数似然函数为 $L(\theta) = \log P(\mathbb{Y}; \theta)$ 。
假定 Y 和 Z 的联合概率分布是 $P(Y, Z; \theta)$ ，完全数据的对数似然函数是 $\log P(\mathbb{Y}, \mathbb{Z}; \theta)$ ，则根据每次观测之间相互独立，有：

$$\begin{aligned}\log P(\mathbb{Y}; \theta) &= \sum_i \log P(Y = y_i; \theta) \\ \log P(\mathbb{Y}, \mathbb{Z}; \theta) &= \sum_i \log P(Y = y_i, Z = z_i; \theta)\end{aligned}$$

3. 由于 \mathbb{Y} 发生，根据最大似然估计，则需要求解对数似然函数：

$$\begin{aligned} L(\theta) &= \log P(\mathbb{Y}; \theta) = \sum_{i=1} \log P(Y = y_i; \theta) = \sum_{i=1} \log \sum_Z P(Y = y_i, Z; \theta) \\ &= \sum_{i=1} \log \left[\sum_Z P(Y = y_i | Z; \theta) P(Z; \theta) \right] \end{aligned}$$

的极大值。其中 $\sum_Z P(Y = y_i, Z; \theta)$ 表示对所有可能的 Z 求和，因为边缘分布 $P(Y) = \sum_Z P(Y, Z)$ 。该问题的困难在于：该目标函数包含了未观测数据的分布的积分和对数。

2.2 EM算法

2.2.1 原理

1. **EM** 算法通过迭代逐步近似极大化 $L(\theta)$ 。

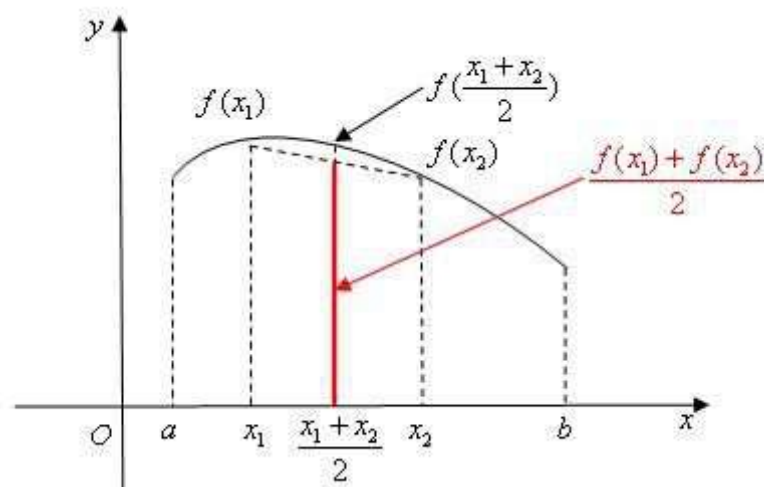
假设在第 i 次迭代后， θ 的估计值为： $\theta^{<i>}$ 。则希望 θ 新的估计值能够使得 $L(\theta)$ 增加，即： $L(\theta) > L(\theta^{<i>})$ 。

为此考虑两者的差： $L(\theta) - L(\theta^{<i>}) = \log P(\mathbb{Y}; \theta) - \log P(\mathbb{Y}; \theta^{<i>})$ 。

这里 $\theta^{<i>}$ 已知，所以 $\log P(\mathbb{Y}; \theta^{<i>})$ 可以直接计算得出。

2. **Jensen** 不等式：如果 f 是凸函数， x 为随机变量，则有： $\mathbb{E}[f(x)] \leq f(\mathbb{E}[x])$ 。

◦ 如果 f 是严格凸函数，当且仅当 x 是常量时，等号成立。



◦ 当 λ_i 满足 $\lambda_j \geq 0, \sum_j \lambda_j = 1$ 时，将 λ_j 视作概率分布。

设随机变量 y 满足概率分布 $p(y = y_j) = \lambda_j$ ，则有： $\log \sum_j \lambda_j y_j \geq \sum_j \lambda_j \log y_j$ 。

3. 考虑到条件概率的性质，则有 $\sum_Z P(Z | Y; \theta) = 1$ 。因此有：

$$\begin{aligned}
L(\theta) - L(\theta^{<i>}) &= \sum_j \log \sum_Z P(Y = y_j, Z; \theta) - \sum_j \log P(Y = y_j; \theta^{<i>}) \\
&= \sum_j \left[\log \sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \frac{P(Y = y_j, Z; \theta)}{P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>})} - \log P(Y = y_j; \theta^{<i>}) \right] \\
&\geq \sum_j \left[\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log \frac{P(Y = y_j, Z; \theta)}{P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>})} - \log P(Y = y_j; \theta^{<i>}) \right] \\
&= \sum_j \left[\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log \frac{P(Y = y_j | Z; \theta) P(Z; \theta)}{P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>})} - \log P(Y = y_j; \theta^{<i>}) \times 1 \right] \\
&= \sum_j \left[\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log \frac{P(Y = y_j | Z; \theta) P(Z; \theta)}{P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>})} \right. \\
&\quad \left. - \log P(Y = y_j; \theta^{<i>}) \times \sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \right] \\
&= \sum_j \left[\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log \frac{P(Y = y_j | Z; \theta) P(Z; \theta)}{P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) P(Y = y_j; \theta^{<i>})} \right]
\end{aligned}$$

等号成立时，需要满足条件：

$$\begin{aligned}
P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) &= \frac{1}{n_Z} \\
\frac{P(Y = y_j, Z; \theta)}{P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>})} &= \text{const}
\end{aligned}$$

其中 n_Z 为随机变量 Z 的取值个数。

4. 令：

$$B(\theta, \theta^{<i>}) = L(\theta^{<i>}) + \sum_j \left[\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log \frac{P(Y = y_j | Z; \theta) P(Z; \theta)}{P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) P(Y = y_j; \theta^{<i>})} \right]$$

则有： $L(\theta) \geq B(\theta, \theta^{<i>})$ ，因此 $B(\theta, \theta^{<i>})$ 是 $L(\theta^{<i>})$ 的一个下界。

◦ 根据定义有： $L(\theta^{<i>}) = B(\theta^{<i>}, \theta^{<i>})$ 。因为此时有：

$$\frac{P(Y = y_j | Z; \theta^{<i>}) P(Z; \theta^{<i>})}{P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) P(Y = y_j; \theta^{<i>})} = \frac{P(Y = y_j, Z; \theta^{<i>})}{P(Y = y_j, Z; \theta^{<i>})} = 1$$

◦ 任何可以使得 $B(\theta, \theta^{<i>})$ 增大的 θ ，也可以使 $L(\theta)$ 增大。

为了使得 $L(\theta)$ 尽可能增大，则选择使得 $B(\theta, \theta^{<i>})$ 取极大值的 θ ： $\theta^{<i+1>} = \arg \max_{\theta} B(\theta, \theta^{<i>})$ 。

5. 求极大值：

$$\begin{aligned}
\theta^{<i+1>} &= \arg \max_{\theta} B(\theta, \theta^{<i>}) \\
&= \arg \max_{\theta} \left[L(\theta^{<i>}) + \sum_j \left(\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log \frac{P(Y = y_j | Z; \theta) P(Z; \theta)}{P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) P(Y = y_j; \theta^{<i>})} \right) \right] \\
&= \arg \max_{\theta} \sum_j \left(\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log \frac{P(Y = y_j | Z; \theta) P(Z; \theta)}{P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) P(Y = y_j; \theta^{<i>})} \right) \\
&= \arg \max_{\theta} \sum_j \left(\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log P(Y = y_j | Z; \theta) P(Z; \theta) \right) \\
&= \arg \max_{\theta} \sum_j \left(\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log P(Y = y_j, Z; \theta) \right)
\end{aligned}$$

其中： $L(\theta^{<i>})$, $P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) P(Y = y_j; \theta^{<i>})$ 与 θ 无关，因此省略。

2.2.2 算法

1. EM 算法：

◦ 输入：

- 观测变量数据 $\mathbb{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$
- 联合分布 $P(Y, Z; \theta)$ ，以及条件分布 $P(Z | Y; \theta)$

联合分布和条件分布的形式已知（比如说高斯分布等），但是参数未知（比如均值、方差）

◦ 输出：模型参数 θ

◦ 算法步骤：

- 选择参数的初值 $\theta^{<0>}$ ，开始迭代。
- E 步：记 $\theta^{<i>}$ 为第 i 次迭代参数 θ 的估计值，在第 $i + 1$ 步迭代的 E 步，计算：

$$\begin{aligned}
Q(\theta, \theta^{<i>}) &= \sum_{j=1}^N \mathbb{E}_{P(Z|Y=y_j; \theta^{<i>})} \log P(Y = y_j, Z; \theta) \\
&= \sum_{j=1}^N \left(\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log P(Y = y_j, Z; \theta) \right)
\end{aligned}$$

其中 $\mathbb{E}_{P(Z|Y=y_j; \theta^{<i>})} \log P(Y = y_j, Z; \theta)$ 表示：对于观测点 $Y = y_j$ ， $\log P(Y = y_j, Z; \theta)$ 关于后验概率 $P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>})$ 的期望。

- M 步：求使得 $Q(\theta, \theta^{<i>})$ 最大化的 θ ，确定 $i + 1$ 次迭代的参数的估计值 $\theta^{<i+1>}$

$$\theta^{<i+1>} = \arg \max_{\theta} Q(\theta, \theta^{<i>})$$

- 重复上面两步，直到收敛。

2. 通常收敛的条件是：给定较小的正数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ ，满足： $\|\theta^{<i+1>} - \theta^{<i>}\| < \varepsilon_1$ 或者 $\|Q(\theta^{<i+1>}, \theta^{<i>}) - Q(\theta^{<i>}, \theta^{<i>})\| < \varepsilon_2$ 。

3. $Q(\theta, \theta^{<i>})$ 是算法的核心，称作 Q 函数。其中：

- 第一个符号表示要极大化的参数（未知量）。
- 第二个符号表示参数的当前估计值（已知量）。

4. EM 算法的直观理解：EM 算法的目标是最大化对数似然函数 $L(\theta) = \log P(\mathbb{Y})$ 。
- 直接求解这个目标是有问题的。因为要求解该目标，首先要得到未观测数据的分布 $P(Z | Y; \theta)$ 。如：身高抽样问题中，已知身高，需要知道该身高对应的是男生还是女生。
但是未观测数据的分布就是待求目标参数 θ 的解的函数。这是一个“鸡生蛋-蛋生鸡”的问题。
 - EM 算法试图多次猜测这个未观测数据的分布 $P(Z | Y; \theta)$ 。
每一轮迭代都猜测一个参数值 $\theta^{<i>}$ ，该参数值都对应着一个未观测数据的分布 $P(Z | Y; \theta^{<i>})$ 。如：已知身高分布的条件下，男生/女生的分布。
 - 然后通过最大化某个变量来求解参数值。这个变量就是 $B(\theta, \theta^{<i>})$ 变量，它是真实的似然函数的下界。
 - 如果猜测正确，则 B 就是真实的似然函数。
 - 如果猜测不正确，则 B 就是真实似然函数的一个下界。
5. 隐变量估计问题也可以通过梯度下降法等算法求解，但由于求和的项数随着隐变量的数目以指数级上升，因此代价太大。
- EM 算法可以视作一个非梯度优化算法。
 - 无论是梯度下降法，还是 EM 算法，都容易陷入局部极小值。

2.2.3 收敛性定理

1. 定理一：设 $P(\mathbb{Y}; \theta)$ 为观测数据的似然函数， $\theta^{<i>}$ 为 EM 算法得到的参数估计序列， $P(\mathbb{Y}; \theta^{<i>})$ 为对应的似然函数序列，其中 $i = 1, 2, \dots$ 。
- 则： $P(\mathbb{Y}; \theta^{<i>})$ 是单调递增的，即： $P(\mathbb{Y}; \theta^{<i+1>}) \geq P(\mathbb{Y}; \theta^{<i>})$ 。
2. 定理二：设 $L(\theta) = \log P(\mathbb{Y}; \theta)$ 为观测数据的对数似然函数， $\theta^{<i>}$ 为 EM 算法得到的参数估计序列， $L(\theta^{<i>})$ 为对应的对数似然函数序列，其中 $i = 1, 2, \dots$ 。
- 如果 $P(\mathbb{Y}; \theta)$ 有上界，则 $L(\theta^{<i>})$ 会收敛到某一个值 L^* 。
 - 在函数 $Q(\theta, \theta^{<i>})$ 与 $L(\theta)$ 满足一定条件下，由 EM 算法得到的参数估计序列 $\theta^{<i>}$ 的收敛值 θ^* 是 $L(\theta)$ 的稳定点。
- 关于“满足一定条件”：大多数条件下其实都是满足的。
3. 定理二只能保证参数估计序列收敛到对数似然函数序列的稳定点 L^* ，不能保证收敛到极大值点。
4. EM 算法的收敛性包含两重意义：
- 关于对数似然函数序列 $L(\theta^{<i>})$ 的收敛。
 - 关于参数估计序列 $\theta^{<i>}$ 的收敛。
- 前者并不蕴含后者。
5. 实际应用中，EM 算法的参数初值选择非常重要。
- 参数的初始值可以任意选择，但是 EM 算法对初值是敏感的，选择不同的初始值可能得到不同的参数估计值。
 - 常用的办法是从几个不同的初值中进行迭代，然后对得到的各个估计值加以比较，从中选择最好的（对数似然函数最大的那个）。
6. EM 算法可以保证收敛到一个稳定点，不能保证得到全局最优点。其优点在于：简单性、普适性。

三、EM算法与高斯混合模型

3.1 高斯混合模型

1. 高斯混合模型 (Gaussian mixture model, GMM): 指的是具有下列形式的概率分布模型:

$$P(y; \theta) = \sum_{k=1}^K \alpha_k \phi(y; \theta_k)$$

其中 α_k 是系数, 满足:

- $\alpha_k \geq 0, \sum_{k=1}^K \alpha_k = 1$ 。
- $\phi(y; \theta_k)$ 是高斯分布密度函数, 称作第 k 个分模型, $\theta_k = (\mu_k, \sigma_k^2)$:

$$\phi(y; \theta_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(-\frac{(y - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}\right)$$

2. 如果用其他的概率分布密度函数代替上式中的高斯分布密度函数, 则称为一般混合模型。

3.2 参数估计

1. 假设观察数据 $\mathbb{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 由高斯混合模型 $P(y; \theta) = \sum_{k=1}^K \alpha_k \phi(y; \theta_k)$ 生成, 其中 $\theta = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_K)$ 。

可以通过 EM 算法估计高斯混合模型的参数 θ 。

2. 可以设想观察数据 y_j 是这样产生的:

- 首先以概率 α_k 选择第 k 个分模型 $\phi(y; \theta_k)$ 。
- 然后以第 k 个分模型的概率分布 $\phi(y; \theta_k)$ 生成观察数据 y_j 。

这样, 观察数据 y_j 是已知的, 观测数据 y_j 来自哪个分模型是未知的。

对观察变量 y , 定义隐变量 z , 其中 $p(z = k) = \alpha_k$ 。

3. 完全数据的对数似然函数为:

$$P(y = y_j, z = k; \theta) = \alpha_k \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k} \exp\left(-\frac{(y_j - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}\right)$$

其对数为:

$$\log P(y = y_j, z = k; \theta) = \log \alpha_k - \log \sqrt{2\pi}\sigma_k - \frac{(y_j - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}$$

后验概率为:

$$P(z = k \mid y = y_j; \theta^{<i>}) = \frac{\alpha_k \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_k^{<i>}} \exp\left(-\frac{(y_j - \mu_k^{<i>})^2}{2\sigma_k^{<i>2}}\right)}{\sum_{t=1}^K \alpha_t \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_t^{<i>}} \exp\left(-\frac{(y_j - \mu_t^{<i>})^2}{2\sigma_t^{<i>2}}\right)}$$

$$\text{即: } P(z = k \mid y = y_j; \theta^{<i>}) = \frac{P(y=y_j, z=k; \theta^{<t>})}{\sum_{t=1}^K P(y=y_j, z=t; \theta)}。$$

则 Q 函数为:

$$Q(\theta, \theta^{<i>}) = \sum_{j=1}^N \left(\sum_z P(z | y = y_j; \theta^{<i>}) \log P(y = y_j, z; \theta) \right)$$

$$= \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K P(z = k | y = y_j; \theta^{<i>}) \left(\log \alpha_k - \log \sqrt{2\pi} \sigma_k - \frac{(y_j - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2} \right)$$

求极大值: $\theta^{<i+1>} = \arg \max_{\theta} Q(\theta, \theta^{<i>})$ 。

根据偏导数为 0, 以及 $\sum_{k=1}^K \alpha_k = 1$ 得到:

◦ α_k :

$$\alpha_k^{<i+1>} = \frac{n_k}{N}$$

其中: $n_k = \sum_{j=1}^N P(z = k | y = y_j; \theta^{<i>})$, 其物理意义为: 所有的观测数据 \mathbb{Y} 中, 产生自第 k 个分模型的观测数据的数量。

◦ μ_k :

$$\mu_k^{<i+1>} = \frac{\overline{Sum}_k}{n_k}$$

其中: $\overline{Sum}_k = \sum_{j=1}^N y_j P(z = k | y = y_j; \theta^{<i>})$, 其物理意义为: 所有的观测数据 \mathbb{Y} 中, 产生自第 k 个分模型的观测数据的总和。

◦ σ^2 :

$$\sigma_k^{<i+1>2} = \frac{\overline{Var}_k}{n_k}$$

其中: $\overline{Var}_k = \sum_{j=1}^N (y_j - \mu_k^{<i>})^2 P(z = k | y = y_j; \theta^{<i>})$, 其物理意义为: 所有的观测数据 \mathbb{Y} 中, 产生自第 k 个分模型的观测数据, 偏离第 k 个模型的均值 ($\mu_k^{<i>}$) 的平方和。

4. 高斯混合模型参数估计的 EM 算法:

◦ 输入:

- 观察数据 $\mathbb{Y} = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$
- 高斯混合模型的分量数 K

◦ 输出: 高斯混合模型参数 $\theta = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_K; \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K; \sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_K^2)$

◦ 算法步骤:

- 随机初始化参数 $\theta^{<0>}$ 。
- 根据 $\theta^{<i>}$ 迭代求解 $\theta^{<i+1>}$, 停止条件为: 对数似然函数值或者参数估计值收敛。

$$\alpha_k^{<i+1>} = \frac{n_k}{N}, \mu_k^{<i+1>} = \frac{\overline{Sum}_k}{n_k}, \sigma_k^{<i+1>2} = \frac{\overline{Var}_k}{n_k}$$

其中:

- $n_k = \sum_{j=1}^N P(z = k | y = y_j; \theta^{<i>})$ 。

其物理意义为: 所有的观测数据 \mathbb{Y} 中, 产生自第 k 个分模型的观测数据的数量。

- $\overline{Sum}_k = \sum_{j=1}^N y_j P(z = k | y = y_j; \theta^{<i>})$ 。

其物理意义为: 所有的观测数据 \mathbb{Y} 中, 产生自第 k 个分模型的观测数据的总和。

$$\blacksquare \overline{Var}_k = \sum_{j=1}^N (y_j - \mu_k^{<i>})^2 P(z = k | y = y_j; \theta^{<i>}).$$

其物理意义为：所有的观测数据 \mathbb{Y} 中，产生自第 k 个分模型的观测数据，偏离第 k 个模型的均值 ($\mu_k^{<i>}$) 的平方和。

四、EM 算法与 kmeans 模型

1. **kmeans** 算法：给定样本集 $\mathbb{D} = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N\}$ ，针对聚类所得簇划分 $\mathcal{C} = \{\mathbb{C}_1, \mathbb{C}_2, \dots, \mathbb{C}_K\}$ ，最小化平方误差：

$$\min_{\mathcal{C}} \sum_{k=1}^K \sum_{\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}_k} \|\mathbf{x}_i - \vec{\mu}_k\|_2^2$$

其中 $\vec{\mu}_k = \frac{1}{|\mathbb{C}_k|} \sum_{\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}_k} \mathbf{x}_i$ 是簇 \mathbb{C}_k 的均值向量。

2. 定义观测随机变量为 \mathbf{x} ，观测数据为 \mathbb{D} 。定义隐变量为 z ，它表示 \mathbf{x} 所属的簇的编号。设参数 $\theta = (\vec{\mu}_1, \vec{\mu}_2, \dots, \vec{\mu}_K)$ ，则考虑如下的生成模型：

$$P(\mathbf{x}, z | \theta) \propto \begin{cases} \exp(-\|\mathbf{x} - \vec{\mu}_z\|_2^2) & \|\mathbf{x} - \vec{\mu}_z\|_2^2 = \min_{1 \leq k \leq K} \|\mathbf{x} - \vec{\mu}_k\|_2^2 \\ 0 & \|\mathbf{x} - \vec{\mu}_z\|_2^2 > \min_{1 \leq k \leq K} \|\mathbf{x} - \vec{\mu}_k\|_2^2 \end{cases}$$

其中 $\min_{1 \leq k \leq K} \|\mathbf{x} - \vec{\mu}_k\|_2^2$ 表示距离 \mathbf{x} 最近的中心点所在的簇编号。即：

- 若 \mathbf{x} 最近的簇就是 $\vec{\mu}_z$ 代表的簇，则生成概率为 $\exp(-\|\mathbf{x} - \vec{\mu}_z\|_2^2)$ 。
- 若 \mathbf{x} 最近的簇不是 $\vec{\mu}_z$ 代表的簇，则生成概率等于 0。

3. 计算后验概率：

$$P(z | \mathbf{x}, \theta^{<i>}) \propto \begin{cases} 1 & \|\mathbf{x} - \vec{\mu}_z\|_2^2 = \min_{1 \leq k \leq K} \|\mathbf{x} - \vec{\mu}_k^{<i>}\|_2^2 \\ 0 & \|\mathbf{x} - \vec{\mu}_z\|_2^2 > \min_{1 \leq k \leq K} \|\mathbf{x} - \vec{\mu}_k^{<i>}\|_2^2 \end{cases}$$

即：

- 若 \mathbf{x} 最近的簇就是 $\vec{\mu}_z$ 代表的簇，则后验概率为 1。
- 若 \mathbf{x} 最近的簇不是 $\vec{\mu}_z$ 代表的簇，则后验概率为 0。

4. 计算 Q 函数：

$$Q(\theta, \theta^{<i>}) = \sum_{j=1}^N \left(\sum_z P(z | \mathbf{x} = \mathbf{x}_j; \theta^{<i>}) \log P(\mathbf{x} = \mathbf{x}_j, z; \theta) \right)$$

设距离 \mathbf{x}_j 最近的聚类中心为 $\vec{\mu}_{t_j}^{<i>}$ ，即它属于簇 t_j ，则有：

$$Q(\theta, \theta^{<i>}) = \text{const} - \sum_{j=1}^N \|\mathbf{x}_j - \vec{\mu}_{t_j}\|_2^2$$

则有：

$$\theta^{<i+1>} = \arg \max_{\theta} Q(\theta, \theta^{<i>}) = \arg \min_{\theta} \sum_{j=1}^N \|\mathbf{x}_j - \vec{\mu}_{t_j}\|_2^2$$

定义集合 $\mathbb{I}_k = \{j | t_j = k\}$ ， $k = 1, 2, \dots, K$ ，它表示属于簇 k 的样本的下标集合。则有：

$$\sum_{j=1}^N \|\mathbf{x}_j - \vec{\mu}_{t_j}\|_2^2 = \sum_{k=1}^K \sum_{j \in \mathbb{I}_k} \|\mathbf{x}_j - \vec{\mu}_k\|_2^2$$

则有：

$$\theta^{<i+1>} = \arg \min_{\theta} \sum_{k=1}^K \sum_{j \in \mathbb{I}_k} \|\vec{\mathbf{x}}_j - \vec{\mu}_k\|_2^2$$

这刚好就是 **k-means** 算法的目标：最小化平方误差。

5. 由于求和的每一项都是非负的，则当每一个内层求和 $\sum_{j \in \mathbb{I}_k} \|\vec{\mathbf{x}}_j - \vec{\mu}_k\|_2^2$ 都最小时，总和最小。即：

$$\vec{\mu}_k^{<i+1>} = \arg \min_{\vec{\mu}_k} \sum_{j \in \mathbb{I}_k} \|\vec{\mathbf{x}}_j - \vec{\mu}_k\|_2^2$$

得到： $\vec{\mu}_k^{<i+1>} = \frac{1}{|\mathbb{I}_k|} \sum_{j \in \mathbb{I}_k} \vec{\mathbf{x}}_j$ ，其中 $|\mathbb{I}_k|$ 表示集合 \mathbb{I}_k 的大小。

这就是求平均值来更新簇中心。

五、EM 算法的推广

5.1 F 函数

1. **F** 函数：假设隐变量 Z 的概率分布为 $\tilde{P}(Z)$ ，定义分布 $\tilde{P}(Z)$ 与参数 θ 的函数 $F(\tilde{P}, \theta)$ 为：

$$F(\tilde{P}, \theta) = \mathbb{E}_{\tilde{P}}[\log P(Y, Z; \theta)] + H(\tilde{P})$$

其中 $H(\tilde{P}) = -\mathbb{E}_{\tilde{P}} \log \tilde{P}$ 是分布 $\tilde{P}(Z)$ 的熵。

通常假定 $P(Y, Z; \theta)$ 是 θ 的连续函数，因此 $F(\tilde{P}, \theta)$ 为 $\tilde{P}(Z)$ 和 θ 的连续函数。

2. 函数 $F(\tilde{P}, \theta)$ 有下列重要性质：

- 对固定的 θ ，存在唯一的分布 $\tilde{P}_{\theta}(Z)$ 使得极大化 $F(\tilde{P}, \theta)$ 。此时 $\tilde{P}_{\theta}(Z) = P(Z | Y; \theta)$ ，并且 \tilde{P}_{θ} 随着 θ 连续变化。
- 若 $\tilde{P}_{\theta}(Z) = P(Z | Y; \theta)$ ，则 $F(\tilde{P}, \theta) = \log P(Y; \theta)$ 。

3. 定理一：设 $L(\theta) = \log P(\mathbb{Y}; \theta)$ 为观测数据的对数似然函数， $\theta^{<i>}$ 为 **EM** 算法得到的参数估计序列，函数 $F(\tilde{P}, \theta) = \sum_Y \mathbb{E}_{\tilde{P}}[\log P(Y, Z; \theta)] + H(\tilde{P})$ ，则：

- 如果 $F(\tilde{P}, \theta)$ 在 $\tilde{P}^*(Z)$ 和 θ^* 有局部极大值，那么 $L(\theta)$ 也在 θ^* 有局部极大值。
- 如果 $F(\tilde{P}, \theta)$ 在 $\tilde{P}^*(Z)$ 和 θ^* 有全局极大值，那么 $L(\theta)$ 也在 θ^* 有全局极大值。

4. 定理二：**EM** 算法的一次迭代可由 **F** 函数的极大-极大算法实现：设 $\theta^{<i>}$ 为第 i 次迭代参数 θ 的估计， $\tilde{P}^{<i>}$ 为第 i 次迭代函数 $\tilde{P}(Z)$ 的估计。在第 $i+1$ 次迭代的两步为：

- 对固定的 $\theta^{<i>}$ ，求 $\tilde{P}^{<i+1>}$ 使得 $F(\tilde{P}, \theta^{<i>})$ 极大化。
- 对固定的 $\tilde{P}^{<i+1>}$ ，求 $\theta^{<i+1>}$ 使得 $F(\tilde{P}^{<i+1>}, \theta)$ 极大化。

5.2 GEM算法1

1. **GEM** 算法1 (**EM** 算法的推广形式)：

- 输入：
 - 观测数据 $\mathbb{Y} = \{y_1, y_2, \dots\}$
 - F 函数
- 输出：模型参数
- 算法步骤：

- 初始化参数 $\theta^{<0>}$, 开始迭代。
 - 第 $i + 1$ 次迭代:
 - 记 $\theta^{<i>}$ 为参数 θ 的估计值, $\tilde{P}^{<i>}$ 为函数 \tilde{P} 的估计值。求 $\tilde{P}^{<i+1>}$ 使得 $F(\tilde{P}, \theta^{<i>})$ 极大化。
 - 求 $\theta^{<i+1>}$ 使得 $F(\tilde{P}^{<i+1>}, \theta)$ 极大化。
 - 重复上面两步直到收敛。
2. 该算法的问题是, 有时候求 $F(\tilde{P}^{<i+1>}, \theta)$ 极大化很困难。

5.3 GEM算法2

1. GEM 算法2 (EM 算法的推广形式) :

- 输入:
 - 观测数据 $\mathbb{Y} = \{y_1, y_2, \dots\}$
 - Q 函数
- 输出: 模型参数
- 算法步骤:
 - 初始化参数 $\theta^{<0>}$, 开始迭代。
 - 第 $i + 1$ 次迭代:
 - 记 $\theta^{<i>}$ 为参数 θ 的估计值, 计算

$$Q(\theta, \theta^{<i>}) = \sum_{j=1}^N \left(\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log P(Y = y_j, Z; \theta) \right)$$

- 求 $\theta^{<i+1>}$ 使得 $Q(\theta^{<i+1>}, \theta^{<i>}) > Q(\theta^{<i>}, \theta^{<i>})$
- 重复上面两步, 直到收敛。

2. 此算法不要求 $Q(\theta, \theta^{<i>})$ 的极大值, 只需要求解使它增加的 $\theta^{<i+1>}$ 即可。

5.4 GEM算法3

1. GEM 算法3 (EM 算法的推广形式) :

- 输入:
 - 观测数据 $\mathbb{Y} = \{y_1, y_2, \dots\}$
 - Q 函数
- 输出: 模型参数
- 算法步骤:
 - 初始化参数 $\theta^{<0>} = (\theta_1^{<0>}, \theta_2^{<0>}, \dots, \theta_d^{<0>})$, 开始迭代
 - 第 $i + 1$ 次迭代:
 - 记 $\theta^{<i>} = (\theta_1^{<i>}, \theta_2^{<i>}, \dots, \theta_d^{<i>})$ 为参数 $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_d)$ 的估计值, 计算

$$Q(\theta, \theta^{<i>}) = \sum_{j=1}^N \left(\sum_Z P(Z | Y = y_j; \theta^{<i>}) \log P(Y = y_j, Z; \theta) \right)$$

- 进行 d 次条件极大化:

- 首先在 $\theta_2^{<i>}, \dots, \theta_d^{<i>}$ 保持不变的条件下求使得 $Q(\theta, \theta^{<i>})$ 达到极大的 $\theta_1^{<i+1>}$
- 然后在 $\theta_1 = \theta_1^{<i+1>}, \theta_j = \theta_j^{<i>}, j = 3, \dots, d$ 的条件下求使得 $Q(\theta, \theta^{<i>})$ 达到极大的 $\theta_2^{<i+1>}$
- 如此继续, 经过 d 次条件极大化, 得到 $\theta^{<i+1>} = (\theta_1^{<i+1>}, \theta_2^{<i+1>}, \dots, \theta_d^{<i+1>})$, 使得 $Q(\theta^{<i+1>}, \theta^{<i>}) > Q(\theta^{<i>}, \theta^{<i>})$
- 重复上面两步, 直到收敛。

2. 该算法将 EM 算法的 M 步分解为 d 次条件极大化, 每次只需要改变参数向量的一个分量, 其余分量不变。