回归：预测与拟合

司继春

2024年2月

什么是计量经济学?

应用场景分类:

1. 微观计量
2. 宏观计量
3. 金融计量

工具方法分类:

1. 简约式（reduced form）
2. 结构式（structrual form）

应用计量：如何学习？

我们的目标是：

1. 看得懂：经典应用文献在说什么，语言的问题
2. 做得出：能够复制出经典文献的结果
3. 会解释：知道软件中的结果该怎么解释
4. 想得到：能够将方法与技术完美的结合，找到合适的选题
5. 写得妙：如何motivate你的选题、模型？细节决定成败！

所以我们需要：

1. 掌握计量经济学的语言体系
2. 理解识别（identification），掌握基本的识别策略
3. 该如何估计
4. 软件怎么操作

微观计量经济学的任务

Heckman(2008)提出，因果推断的三个任务：

1. 定义问题、假说或者反事实——逻辑、理论与想象
2. 从总体数据中识别参数——如果没有抽样偏差，能否还原反事实？
3. 从实际数据中识别参数——统计理论，估计与检验

「Effect of Causes」 versus 「Causes of Effects」

实证论文的结构

1. 导言
2. 制度背景
3. 数据与描述性统计
4. 实证模型与结果
5. 稳健性检验
6. 结论

数据来源

- 家庭微观数据
  - CFPS
  - CHFS
  - CPS
  - .....
- 企业数据
  - 上市公司数据：Wind、Bloomberg、国泰安
  - 工业企业数据库、经济普查数据库、税务数据库
  - .....
- 网络数据

线性回归：两种不同的视角

线性回归是计量经济学中最常用的工具，然而在实践中，根据使用目的不同，线性回归这一工具在建模时的具体使用方法是不同的。

- 作为条件期望的预测工具：目标是预测的准确
  - 在因果推断中，核心问题其实就是预测反事实
- 作为因果推断的工具：目标是得到处理效应的某种平均
  - 要求外生性

这一节我们首先讲解作为预测工具的线性回归，接下来更重要的：外生性条件下的线性回归。

预测问题

- 拟合（fitting）以及预测是最经典的统计问题之一，而回归（regression）是解决这类问题最常用的手段。
- 如果我们观察到一系列数据$(y_i, x_i), i = 1, ..., N$，我们希望使用$x_i$的线性函数：$f(x_i) = \alpha + \beta x_i$对$y_i$进行预测，那么只要确定了其中的参数$\alpha$和$\beta$就确定了这个预测的函数。
- 我们称：
  - x_i为自变量（independent variable）或者解释变量（explanatory variable）、回归元（regressor）
  - 而y_i为因变量（dependent variable）或者被解释变量（explained variable）、结果变量（outcome variable）。

一元线性回归

一元线性回归的例子：身高与体重

一个非常传统的问题是个人身高与体重的关系，一般而言我们会用身高对体重进行预测，即使用身高的一个函数：

$$f(h) = \alpha + \beta \cdot h$$

对体重进行预测。只要我们知道了α, β，对于一个身高已知、体重未知的人，我们就可以使用以上函数对未知的体重进行预测。

回归与插值

我们需要区分函数关系与相关关系：

- 如果给定一个输入，有确定的输出，那么两个变量是函数关系，比如：

$$f(h) = \alpha + \beta \cdot h$$

- 如果给定一个输入，可能有不同的值与之相对应，那么是相关关系，比如身高都为170的人，体重完全可能不同

在此基础上：

- 回归需要解决的是相关关系，我们使用一个具有确定性的函数输出对不确定的y进行预测
- 如果一个函数是未知的，为了确定这个函数，解决方案为插值（interpolation）而非回归。

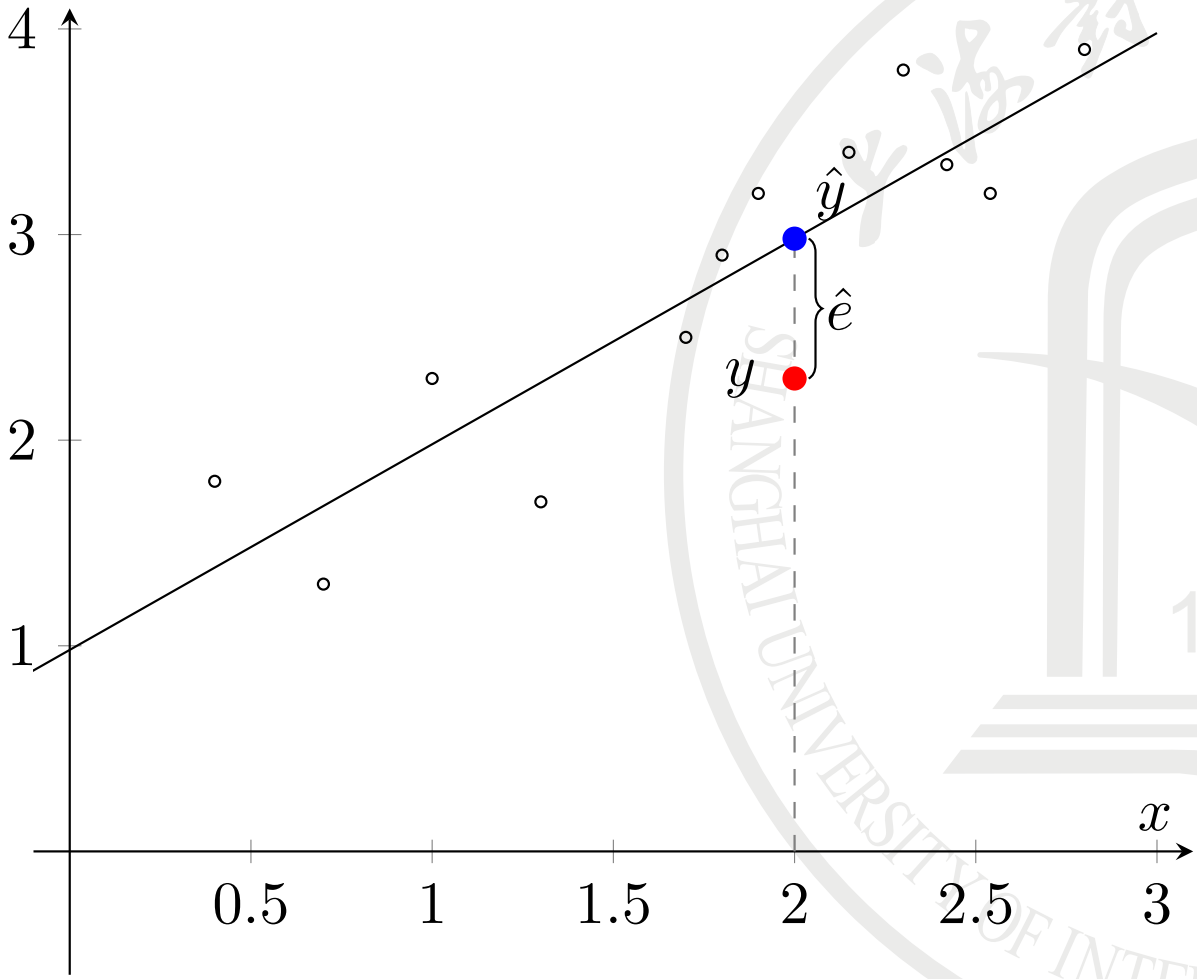
预测误差

如果给定一个α和β的值$\left(\tilde{\alpha}, \tilde{\beta}\right)$，我们可以计算使用以上函数对$y_i$进行预测的误差，即**残差（residuals）**：

$$\tilde{e}_i = y_i - \tilde{\alpha} - \tilde{\beta} x_i$$

- 残差即使用函数$f(x) = \tilde{\alpha} + \tilde{\beta} \cdot x$对个体$i$的$y$：$y_i$进行预测的预测误差
- 残差应该越“小”越好。

预测误差



最小二乘法

为了使得预测误差（残差）更小，一个最常见的办法是最小化均方误差（mean squared error）：

- 首先将残差计算平方，从而当预测误差为0（完美预测）时，残差的平方为0，否则不管高估还是低估，都是残差平方越小越好
- 其次对所有样本的残差平方求平均：

$$\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} e_i^2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (y_i - \alpha - \beta x_i)^2$$

进而，我们只要选择一个α, β使得以上的残差平方和最小化即可：

$$\left(\hat{\alpha}, \hat{\beta}\right) = \arg\min_{\alpha,\beta} \sum_{i=1}^{N} e_i^2 = \arg\min_{\alpha,\beta} \sum_{i=1}^{N} (y_i - \alpha - \beta x_i)^2$$

最小二乘法

- 解上述最小化问题，得到：

$$\begin{cases} \frac{\partial \sum_{i=1}^{N}(y_i-\alpha-\beta x_i)^2}{\partial \alpha} = -2\sum_{i=1}^{N}(y_i-\alpha-\beta x_i) = 0 \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^{N}(y_i-\alpha-\beta x_i)^2}{\partial \beta} = -2\sum_{i=1}^{N}(y_i-\alpha-\beta x_i)\,x_i = 0 \end{cases}$$

- 化简上述问题，得到：

$$\begin{cases} \alpha = \bar{y} - \beta\bar{x} \\ \alpha\bar{x} = \frac{1}{N}\left(\sum_{i=1}^{N} x_i y_i - \beta\sum_{i=1}^{N} x_i^2\right) \end{cases}$$

最小二乘法

- 最终得到：

$$\begin{cases} \hat{\beta} = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i y_i - \bar{x}\bar{y}}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2 - \bar{x}^2} = \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \\ \hat{\alpha} = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x} \end{cases}$$

即最小二乘估计量（least-squares estimator）。

- 在得到$\hat{\alpha}$、$\hat{\beta}$以后，给定任意一个x，可以计算其对应的对y的预测值：

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x$$

而残差$\hat{e}$是对于已知的x_i, y_i，使用$\hat{y}$对y_i进行预测的误差：

$$\hat{e} = y_i - \hat{y}_i = y_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta}x_i$$

一元线性回归示例

身高与体重

在下面的程序中，我们使用2014年CFPS的数据，使用体重对身高做简单的一元线性回归，回归结果为：

$$\hat{y} = -128.2 + 1.528 \times x$$

由于身高的单位为厘米，体重的单位为斤，所以该回归结果意味着，身高每增加1cm，平均而言体重会增加大约1.528斤。此外，如果我们知道某个人身高为175cm，而不知道其具体身高，那么对其身高的最优预测为：

$$\hat{y}_{175} = 1.528 \times 175 - 128.2 = 139$$

即身高175cm的人平均身高为139斤。

一元线性回归示例

身高与体重

```
1  // file: reg_one_variate.do
2  use datasets/cfps_adult, clear
3  drop if qp102<0
4  drop if qp101<130
5  reg qp102 qp101
6  outreg2 using reg_one_variate.tex, replace
7  predict p_weight
8  label variable p_weight "预测的体重"
9  sort qp101
10 twoway (scatter qp102 qp101 if mod(_n,30)==20) (
       line p_weight qp101 if qp101>130 & qp101<200),
       xscale(range(130 200))
11 graph export reg_one_variate.pdf, replace
```

一元线性回归的三个性质

- 如果我们将x_i的平均值$\bar{x}$带入到拟合公式中，可以得到：

$$\hat{\alpha} + \hat{\beta}\bar{x} = \bar{y} - \hat{\beta}\bar{x} + \hat{\beta}\bar{x} = \bar{y}$$

因而使用最小二乘法进行预测时，在x_i的平均值$\bar{x}$处的预测即$\bar{y}$。

- 残差的和：

$$\sum_{i=1}^{N} \hat{e}_i = \sum_{i=1}^{N} \left(y_i - \hat{\alpha} - \hat{\beta} x_i \right) = N\bar{y} - N\hat{\alpha} - N\hat{\beta}\bar{x} = 0$$

- 残差和x之间不相关：

$$\sum_{i=1}^{N} x_i \hat{e}_i = 0$$

从而残差和x之间的样本相关系数为0。

0/1型变量的一元线性回归

对于回归：

$$\hat{y}_i = \alpha + \beta \times x_i$$

x_i只能取0/1两个值，此时我们称x_i为**虚拟变量（dummy variable）**

- 令N_0为样本中$x_i = 0$的个数，N_1为样本中$x_i = 1$的个数
- 记$\bar{y}_1$为对应于$x_i = 1$的y_i的均值，记$\bar{y}_0$为对应于$x_i = 0$的y_i的均值，那么我们有（how？）：

$$\begin{cases} \hat{\beta} = \bar{y}_1 - \bar{y}_0 \\ \hat{\alpha} = \bar{y}_0 \end{cases}$$

0/1型变量的一元线性回归

将以上结论带入到预测方程中，可以得到：

- 当$x_i = 0$时，有：

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x_i = \hat{\alpha} = \bar{y}_0$$

- 当$x_i = 1$时，有：

$$\hat{y} = \hat{\alpha} + \hat{\beta}x_i = \hat{\alpha} + \hat{\beta} = \bar{y}_1 - \bar{y}_0 + \bar{y}_0 = \bar{y}_1$$

即，当x_i只能取0/1两个值时，对y的预测即分组的均值：分组均值即最优预测。

虚拟变量回归与均值比较

不同性别收入比较

我们使用2014年CFPS的数据比较不同性别个人收入的不同。我们使用以下程序分别使用描述性统计和回归的方法进行比较。

- 我们首先使用剔除了收入的异常值（即个人收入<0的观测）
- 接着使用outreg2命令根据性别将描述性统计（只导出了观测数和收入的均值）导出
- 可以看到，女性平均收入为5751元，而男性平均收入为12287元，男性收入比女性多了6536元。

虚拟变量回归与均值比较

不同性别收入比较

代码 1: 不同性别的收入对比

```
1 // file: reg_with_dummy.do
2 use datasets/cfps_adult, clear
3 keep cfps_gender p_income
4 drop if p_income<0
5 bysort cfps_gender: outreg2 using reg_with_dummy_su
      .tex, replace sum(log) eqkeep(N mean) keep(
      p_income)
6 reg p_income cfps_gender
7 outreg2 using reg_with_dummy.tex, replace
```

虚拟变量回归与均值比较

不同性别收入比较

	(1)	(2)	(3)	(4)
	cfps_gender 0		cfps_gender 1	
VARIABLES	N	mean	N	mean
p_income	18,308	5,751	18,398	12,287

虚拟变量回归与均值比较

不同性别收入比较

VARIABLES	(1) p_income
cfps_gender	6,536***
	(194.3)
Constant	5,751***
	(137.5)
Observations	36,706
R-squared	0.030

Standard errors in parentheses
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

多元线性回归

以上讨论了一元线性回归，即使用一个解释变量x对y进行预测。我们还可以继续推广，即使用多个x对y进行预测，即使用函数：

$$f\left(x_i|\beta\right)=\beta_1 x_{i1}+\beta_2 x_{i2}+\cdots+\beta_K x_{iK}$$

其中

$$x_i=\begin{pmatrix} x_{i1} \\ \vdots \\ x_{iK} \end{pmatrix}, \beta=\begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_K \end{pmatrix}$$

一般而言，我们通常会保留常数项，不失一般性，我们令$x_{i1}=1$。

多元线性回归

在这里假设函数$f\left(x_i,|\beta\right)$是参数线性的，即不存在β_k之间的非线性关系。比如：

- 我们排除了如下的函数形式：

$$\hat{y}_i = f\left(x_i|\beta\right) = \beta_1 x_{i1} + \beta_1^2 x_{2i}$$

由于存在β_1的非线性函数，从而以上设定不是线性回归设定。

- 包含x_i的非线性函数是可以的，比如：

$$\hat{y}_i = \beta_1 + \beta_2 x_{1i} + \beta_3 x_{1i}^2$$

是完全允许的（此时不妨记$x_{2i} = x_{1i}^2$）。

多元线性回归

为了方便起见，我们一般用向量表述上述方程：

$$f(x_i) = x_i'\beta$$

其中：

$$x_i = \begin{pmatrix} 1 \\ x_{i2} \\ \vdots \\ x_{iK} \end{pmatrix}, \beta = \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_K \end{pmatrix}$$

为两个K维列向量。给定一个β，我们可以使用$x_i'\beta$对y_i进行预测的预测值：

$$\hat{y}_i = x_i'\beta$$

以及预测的误差，即残差：

$$\hat{e}_i = y_i - \hat{y}_i = y_i - x_i'\beta$$

最小二乘法（OLS）

如果我们记：

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix}, X = [x_1, x_2, \cdots x_N]' = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1K} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{N1} & x_{N2} & \cdots & x_{NK} \end{bmatrix}$$

那么残差向量为：

$$\hat{e} = Y - X\beta = \begin{pmatrix} \hat{e}_1 \\ \hat{e}_2 \\ \vdots \\ \hat{e}_N \end{pmatrix}_{N \times 1}$$

而最小二乘法最小化：

$$\min_b \sum_{i=1}^{N} \hat{e}_i^2 = \min_b \hat{e}'\hat{e} = \min_b (Y - Xb)'(Y - Xb)$$

最小二乘法（OLS）

对以上目标函数求导数并令其等于0，可以得到一阶条件：

$$\frac{\partial (Y-Xb)'(Y-Xb)}{\partial b} = \frac{\partial (Y'Y - Y'Xb - b'X'Y + b'X'Xb)}{\partial b} = -X'Y - X'Y + 2X'Xb = 0$$

解以上方程可以得到：

$$X'Xb = X'Y \Rightarrow \hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'Y$$

以上最大化问题的二阶导为：

$$\frac{\partial (y-X\beta)'(y-X\beta)}{\partial \beta} = 2X'X$$

为一个正定矩阵，因而以上根据一阶条件求得的解：

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'Y = \left(\sum_{i=1}^{N} x_i x_i'\right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^{N} x_i y_i\right)$$

识别条件

注意以上我们使用了矩阵$X'X$的逆矩阵，由于$\text{rank}\,(X'X) = \text{rank}\,(X)$，因而$X'X$可逆性要求$\text{rank}\,(X) = K$，即要求矩阵$X$是列满秩的（同时样本量$N \geq K$）。为此我们必须引入如下假设：

识别条件

矩阵X为列满秩矩阵，即$\text{rank}\,(X) = K$。

矩阵X是列满秩的意味着：

- X的列数小于行数，即$K < N$。
- X的任何一列不能被其他列线性表示出来——无完全共线性（perfect coliearity）

识别条件

收入与消费、储蓄

家庭收入（I）等于家庭的消费C加储蓄S，$I = C + S$，那么I, C, S不能同时出现在X里面，否则X列不满秩。但是由于$\ln(I) \neq \ln(C) + \ln(S)$，因而$X$中同时包含$\ln(I), \ln(C), \ln(S)$理论上仍然是可以的。

识别条件

- 如果以上假设不满足，且$N > K$，那么最小化最小二乘目标函数的解不唯一
- 如果识别条件不满足，将会有无穷多个解使得最小化最小二乘目标函数
  - 比如，如果我们使用两个变量：x_{i2}, x_{i3}和常数项1共同预测y，且$\left(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3\right)$最小化最小二乘目标函数
  - 如果矩阵X不满秩，比如，$x_{i2} + x_{i3} = 1$，令$\hat{\beta}_2^* = \hat{\beta}_2 + c$，$c$为任意常数，那么：

$$\begin{aligned}
\hat{y}_i &= \hat{\beta}_1 + \left(\hat{\beta}_2^* - c\right) x_{i2} + \hat{\beta}_3 x_{i3} \\
&= \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2^* x_{i2} - c x_{i2} + \hat{\beta}_3 x_{i3} \\
&= \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2^* x_{i2} - c\left(1 - x_{i3}\right) + \hat{\beta}_3 x_{i3} \\
&= \left(\hat{\beta}_1 - c\right) + \hat{\beta}_2^* x_{i2} + \left(\hat{\beta}_3 + c\right) x_{i3} \\
&\triangleq \hat{\beta}_1^* + \hat{\beta}_2^* x_{i2} + \hat{\beta}_3^* x_{i3}
\end{aligned}$$

因而$\left(\hat{\beta}_1^*, \hat{\beta}_2^*, \hat{\beta}_3^*\right)$这组参数与$\left(\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3\right)$这组参数得到了完全一模一样的预测，因而$\left(\hat{\beta}_1^*, \hat{\beta}_2^*, \hat{\beta}_3^*\right)$也是最小二乘问题的解。

虚拟变量

分类变量加入回归中需要使用**虚拟变量（dummy variables）**，即如果一个变量的取值范围为$G_i = 1, 2, ..., g$，我们可以相应的定义g个虚拟变量：

$$d_{ij} = 1\{G_i = j\} = \begin{cases} 1 & if\ G_i = j \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

虚拟变量

虚拟变量

对于「文化程度」这个分类变量（G_i），可能有7种不同的取值，比如$G_i = 0$代表文盲，$G_i = 6$代表研究生等等，那么虚拟变量可以如下定义：

G	d_0	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
0	1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0
3	0	0	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0
6	0	0	0	0	0	0	1

虚拟变量

- 由于在虚拟变量定义中，$\sum_{j=0}^{g} d_{ij} = 1$，即7个虚拟变量线性组合出了常数项，所以在包含常数项的回归中，$d_{i1}, ..., d_{ig}$不能同时出现。
- 解决以上问题的方法是忽略掉常数项，或者忽略掉$d_{i1}, ..., d_{ig}$中的任何一个变量，以上两种方法都可以使得矩阵$X'X$可逆，当然在现实中我们经常使用第二种方法，即抛弃其中的一个分组虚拟变量。

虚拟变量回归

不同教育程度的收入

我们同样使用2014年CFPS数据，对不同教育程度的收入进行分解。在数据集中，变量te4代表教育程度，比如te4=0时表示文盲，te4=1代表小学等等，te4总共有7个可能的取值（文化程度）。我们使用如下程序计算分组差异或者分组平均：

虚拟变量回归

不同教育程度的收入

代码 2: 不同性别的收入对比

```
// file: reg_with_dummies.do
use datasets/cfps_adult, clear
drop if p_income<0
drop if te4<0
tab te4, gen(edu)
reg p_income edu*
outreg2 using reg_with_dummies.tex, replace
reg p_income edu*, noconstant
outreg2 using reg_with_dummies.tex, append
reg p_income edu2-edu7
outreg2 using reg_with_dummies.tex, append
```

虚拟变量回归

不同教育程度的收入

VARIABLES	(1) p_income	(2) p_income	(3) p_income
edu1	-33,868***	8,211***	
	(6,705)	(1,092)	
edu2	-28,200***	13,879***	5,669***
	(6,661)	(781.4)	(1,343)
edu3	-27,527***	14,551***	6,341***
	(6,638)	(554.9)	(1,225)
edu4	-27,441***	14,638***	6,428***
	(6,670)	(850.1)	(1,384)
edu5	-18,867***	23,212***	15,002***
	(6,743)	(1,306)	(1,702)
edu6	-17,647***	24,432***	16,221***
	(6,773)	(1,451)	(1,817)
o.edu7	-		
edu7		42,079***	33,868***
		(6,615)	(6,705)
Constant	42,079***		8,211***
	(6,615)		(1,092)
Observations	3,226	3,226	3,226
R-squared	0.042	0.383	0.042

Standard errors in parentheses
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

虚拟变量回归

- 如果一定要加入edu7这个虚拟变量，那么可以在reg命令后面加入noconstant选项，该选项即防止线性回归中包含常数项，从而我们可以包含edu7这个变量。
- 如果包含edu7而不包含常数项，那么估计的系数就是每个分组的收入的平均值，
- 如果包含常数项而把edu7忽略掉，那么edu1-edu7估计的系数即每个组的收入与edu7这个组（基准组）的差异
  - 比如edu1的系数为-33868，那么意味着文化程度为文盲的平均收入比文化程度为硕士的平均收入低33868元。
  - 第3列同理，如果把edu1去掉，那么edu2-edu7的系数都是与edu1组（基准组）相比的收入差异。

虚拟变量回归

从而：

$$\begin{cases} \bar{y}_1 &= \tilde{\beta}_1 \\ \bar{y}_2 &= \tilde{\beta}_1 + \tilde{\beta}_2 \\ \vdots & \\ \bar{y}_g &= \tilde{\beta}_1 + \tilde{\beta}_g \end{cases}$$

或者等价的：

$$\begin{cases} \tilde{\beta}_1 &= \bar{y}_1 \\ \tilde{\beta}_2 &= \bar{y}_2 - \bar{y}_1 \\ \vdots & \\ \tilde{\beta}_g &= \bar{y}_g - \bar{y}_1 \end{cases}$$

参数回归：条件期望的估计

回忆条件期望的定义：

$$\mathbb{E}(y|x) = \arg\min_{h\in\mathbb{H}} \left\{ \mathbb{E}\left[(y - h(x))^2 \right] \right\}$$

如果假设函数$h(x) = x'\beta$，即x的一个线性函数，那么上式变为：

$$\beta_0 = \arg\min_{\beta} \left\{ \mathbb{E}\left[(y - x'\beta)^2 \right] \right\}$$

从而$\mathbb{E}(y|x) = x'\beta_0$，使用样本平均代（$\frac{1}{N}\sum$）替总体期望（$\mathbb{E}$），得到：

$$\hat{\beta} = \arg\min_{\beta} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (y_i - x_i'\beta)^2$$

即普通最小二乘估计量（Ordinary Least Squares）。

条件期望与回归

重要假设：

线性函数假设

假设随机变量y给定x的条件期望$\mathbb{E}(y|x)$为线性函数，
即：$h(x) = x'\beta$

那么：

$$\beta_0 = \arg\min_{\beta} \mathbb{E}\left(\left[y - x'\beta\right]^2\right)$$

即为真实参数，OLS估计量$\hat{\beta}$为β_0的估计量，而条件期望的估计为：

$$\widehat{\mathbb{E}(y|x)} = x'\hat{\beta}$$

误差项

定义误差项（error term）：

$$u_i = y_i - x_i'\beta_0 = y_i - \mathbb{E}\left(y_i|x_i\right)$$

为总体的误差。注意这里误差项和残差并不是一个概念：

- 误差项是一个总体的不可观测的随机变量，定义中使用的是条件期望的真实值β_0；
- 而残差是在得到β_0的估计值$\hat{\beta}$之后得到的实现的预测误差：$\hat{u}_i = y_i - x_i'\hat{\beta}$定义中使用的是估计值$\hat{\beta}$。

误差项

- 根据u_i的定义，有：

$$\mathbb{E}\left(u_i|x_i\right)=\mathbb{E}\left(y_i-\mathbb{E}\left(y_i|x_i\right)|x_i\right)=\mathbb{E}\left(y_i|x_i\right)-\mathbb{E}\left(y_i|x_i\right)=0$$

我们称误差项与x_i是**均值独立**（**mean independence**）的。

- 注意均值独立意味着不相关：

$$\begin{aligned}\mathbb{C}\mathrm{ov}\left(x_i,u_i\right)&=\mathbb{E}\left(x_iu_i\right)-\mathbb{E}\left(x_i\right)\mathbb{E}\left(u_i\right)\\&=\mathbb{E}\left[\mathbb{E}\left(x_iu_i|x_i\right)\right]-\mathbb{E}\left(x_i\right)\mathbb{E}\left[\mathbb{E}\left(u_i|x_i\right)\right]\\&=\mathbb{E}\left[x_i\mathbb{E}\left(u_i|x_i\right)\right]=0\end{aligned}$$

总体回归方程

在定义了误差项之后，我们就可以将y_i分解为均值独立的两部分：

$$y_i = \mathbb{E}(y_i|x_i) + u_i = x_i'\beta_0 + u_i$$

- 以上方程我们通常称为**总体回归方程**（**population regression equation**），接下来将经常使用以上方程代表我们的模型。
- 注意在这里由于我们是以拟合和预测作为目的，误差项u_i是根据条件期望定义出来的。这与下一章中我们需要假设均值独立是有区别的。

总体回归方程

- u_i与x_i虽然是均值独立的，$\mathbb{E}(u_i|x_i)=0$，但是并没有对$\mathbb{E}\left(u_i^2|x_i\right)$做任何假设，因而$\mathbb{E}\left(u_i^2|x_i\right)$或者条件方差$\mathbb{V}(u_i|x_i)$可以是$x_i$的任意函数。
- 如果$\mathbb{V}(u_i|x_i)=\mathbb{E}\left(u_i^2|x_i\right)$不为常数，那么我们称$u_i$具有异方差（heteroscedasticity）；
- 如果$\mathbb{V}(u_i|x_i)=\mathbb{E}\left(u_i^2|x_i\right)=\mathbb{E}\left(u_i^2\right)$，那么我们称$u_i$具有同方差（homoscedasticity）性质。
- 均值独立意味着x_i对u_i没有预测能力，而异方差的存在意味着x_i对u_i的方差仍然具有预测能力，两者并不矛盾。
- 注意，由于：

$$\mathbb{V}(y_i|x_i)=\mathbb{V}\left(x_i'\beta_0+u_i|x_i\right)=\mathbb{V}(u_i|x_i)$$

即$y_i|x_i$的条件方差也就是$u_i|x_i$的条件方差。

异方差

异方差示例

记y_i为学生i的分数，$d_i = 0/1$代表性别的虚拟变量，假设：

$$\mathbb{E}\left(y_i|d_i\right) = 85 + 0 \times d_i = 85$$

即男生和女生的平均成绩相同，都是85分，然而如果记误差项：$u_i = y_i - 85$，那么：

$$\mathbb{V}\left(u_i|d_i\right) = 40 + 10d_i$$

是完全有可能出现的。如果：

$$\begin{cases} \mathbb{E}\left(y_i|d_i\right) = 85 - 5 \times d_i \\ \mathbb{V}\left(y_i|d_i\right) = 40 + 10d_i \end{cases}$$

即男生平均分比女生低5分，但是同时异方差仍然存在，这当然也是可能的情况，虽然此时$u_i = y_i - 85 - 5d_i$与d_i之间是均值独立的。

最小二乘的统计性质

我们现在将最小二乘估计$\hat{\beta}$看成是总体回归方程中真值β_0的一个估计。在此基础上，我们继续讨论最小二乘估计$\hat{\beta}$的统计性质，包括$\hat{\beta}$的无偏性、一致性。为此我们引入如下假设：

独立同分布假设

设样本$(x_i', y_i)', i = 1, 2, ..., N$独立同分布。

注意独立同分布假设与异方差并不矛盾：

- 异方差指的是条件方差$\mathbb{V}(y_i|x_i) = \sigma^2(x_i)$不为常数
- 然而同分布则意味着无条件方差$\mathbb{V}(y_i)$不随i的变化而变化，两者是不矛盾的。

OLS的统计性质

$$
\begin{aligned}
\hat{\beta} &= \left(X'X\right)^{-1} X'Y \\
&= \left[\sum_{i=1}^{N}\left(x_i x_i'\right)\right]^{-1}\left[\sum_{i=1}^{N}\left(x_i y_i\right)\right] \\
&= \left[\sum_{i=1}^{N}\left(x_i x_i'\right)\right]^{-1}\left[\sum_{i=1}^{N}\left[x_i\left(x_i'\beta_0 + u_i\right)\right]\right] \\
&= \left[\sum_{i=1}^{N}\left(x_i x_i'\right)\right]^{-1}\left[\sum_{i=1}^{N}\left(x_i x_i'\beta_0 + x_i u_i\right)\right] \\
&= \beta_0 + \left[\sum_{i=1}^{N}\left(x_i x_i'\right)\right]^{-1}\left(\sum_{i=1}^{N} x_i u_i\right) \\
&= \beta_0 + \left(X'X\right)^{-1} X'u
\end{aligned}
$$

其中$u = [u_1, ..., u_N]'$。

无偏性

进一步，有：

$$
\begin{aligned}
\mathbb{E}\left(\hat{\beta}\right) &= \mathbb{E}\left[\mathbb{E}\left(\hat{\beta}|X\right)\right] \\
&= \mathbb{E}\left[\mathbb{E}\left(\beta_0 + \left[\sum_{i=1}^{N}\left(x_i x_i'\right)\right]^{-1}\left(\sum_{i=1}^{N} x_i u_i\right)|X\right)\right] \\
&= \beta_0 + \mathbb{E}\left[\left[\sum_{i=1}^{N}\left(x_i x_i'\right)\right]^{-1}\mathbb{E}\left(\sum_{i=1}^{N} x_i u_i|X\right)\right] \\
&= \beta_0 + \mathbb{E}\left[\left[\sum_{i=1}^{N}\left(x_i x_i'\right)\right]^{-1}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i \mathbb{E}\left(u_i|X\right)\right)\right] \\
&= \beta_0
\end{aligned}
$$

一致性

如果(x_i, y_i)是独立同分布的，且$\mathbb{E}\left(x_{ik}^2\right) < \infty$以及$\mathbb{E}\left|x_{ik}u_i\right| < \infty, k = 1, ..., K$，根据大数定律，有：

$$\begin{cases} \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i x_i'\right) \xrightarrow{p} \mathbb{E}\left(x_i x_i'\right) \\ \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i u_i\right) \xrightarrow{p} \mathbb{E}\left(x_i u_i\right) = 0 \end{cases}$$

由于矩阵求逆为连续映射，因而：

$$\hat{\beta} - \beta_0 = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i x_i'\right)\right]^{-1}\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i u_i\right) \xrightarrow{p} \mathbb{E}\left(x_i x_i'\right)^{-1}\mathbb{E}\left(x_i u_i\right) = 0$$

正态性假设与条件极大似然估计

在前面的讨论中，我们在假设条件期望函数为线性函数的条件下，得出最小二乘法可以看做是条件期望的估计。

- 注意在以上过程中，我们只对条件期望的函数形式进行了假设，而没有对条件分布做任何假设。
- 接下来，我们将加强条件分布的假设，讨论条件期望函数的极大似然估计。

正态性假设

条件正态性假设

设样本$(y_i, x_i')', i = 1, ..., N$独立同分布，且$y_i$给定$x_i$的条件分布为同方差的正态分布，其条件期望为线性函数，即：

$$y_i|x_i \sim N\left(x_i'\beta_0, \sigma^2\right)$$

或者等价地：

$$Y|X \sim N\left(X\beta_0, \sigma^2 I\right)$$

以上假设等价于假设误差项$u_i|x_i \sim N\left(0, \sigma^2\right)$，或者$u|X \sim N\left(0, \sigma^2 I\right)$。

正态性假设

这里需要注意的是，即使我们假设了$y_i|x_i$服从正态分布，这也不意味着y_i也服从正态分布：

条件正态与正态

假设数据生成过程：

$$y_i = 85 - 5 \times d_i + u_i$$

其中$d_i = 0/1$为虚拟变量，且假设$P(d_i = 1) = 0.3$，$u_i|x_i \sim N(0, 4)$，那么y_i本身为一个混合正态分布（作业）。

条件极大似然估计

根据以上假设，条件密度函数为：

$$f\left(y_i|x_i\right)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left\{-\frac{\left(y_i-x_i'\beta_0\right)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

因而条件似然函数为：

$$L\left(\beta,\sigma|y,x\right)=-\frac{N}{2}\ln\left(2\pi\right)-\frac{N}{2}\ln\sigma^2-\sum_{i=1}^{N}\frac{\left(y_i-x_i'\beta\right)^2}{2\sigma^2}$$

最大化以上函数，得到：

$$\begin{cases}\hat{\beta}=\left(\sum_{i=1}^{N}x_ix_i'\right)^{-1}\left(\sum_{i=1}^{N}x_iy_i\right)=\left(X'X\right)^{-1}X'Y\\ \hat{\sigma}^2=\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(y_i-x_i'\hat{\beta}\right)^2}{N}=\frac{\sum_{i=1}^{N}\hat{u}_i^2}{N}\end{cases}$$

其中$\hat{u}_i=y_i-x_i'\hat{\beta}$为残差。再次，我们得到了最小二乘估计量。

最小二乘与条件期望

条件期望即我们使用自变量x对因变量y的最优预测。然而从条件期望得到OLS的过程中，我们假设了条件期望的线性函数形式：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \cdots + \beta_{K-1} x_{K-1} + u$$

然而这一条件**未必满足**：

- 如果条件期望函数的确为线性函数，OLS是对条件期望函数$\mathbb{E}(y|x)$的最优预测；
- 如果条件期望函数不是线性函数，则OLS是对条件期望函数的最优线性逼近：

$$\beta_0 = \arg\min_{\beta} \left[x'\beta - \mathbb{E}(y|x)\right]^2$$

最小二乘与条件期望

然而，很多时候条件期望函数并非线性函数。

- 大多数情况下线性函数是一个“性价比”极高的假设：避免了模型的复杂，同时也足够精准
- 然而有的时候，线性函数会有很大问题。我们首先需要知道，何时需要担心线性假设的问题。

条件期望函数形式问题

支撑集问题

支撑集（support）即一个随机变量的取值范围。如果被解释变量为家庭的储蓄率（saving_rate），我们知道$\text{supp}\left(savin_rate_i\right) = [0, 1]$。此时，如果我们选取家庭资产规模（wealth）作为解释变量：

$$saving\_rate_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot wealth_i + u_i$$

由于$\text{supp}\left(income_i\right) = [0, \infty)$，因而不管回归得到的系数$\hat{\beta}_1$是正或者负，对于一个资产规模足够大的家庭，总会使得预测的储蓄率超过1（或者低于0）。

条件期望函数形式问题

经济增长

如果令y_t为时期t时国家的GDP，根据索洛模型（Acemoglu, 2009, Chaper 3），y_t满足如下关系式：

$$g_t = \beta_0 + \beta_1 \ln y_{t-1} + u_t$$

其中$g_t = \ln y_t - \ln y_{t-1}$为GDP的对数增长率。根据上式，得到：

$$y_t = \exp\{\beta_0 + (1+\beta_1)\ln y_{t-1} + u_t\} = e^{\beta_0} y_{t-1}^{1+\beta_1} e^{u_t}$$

从而条件期望函数：

$$\mathbb{E}(y_t|y_{t-1}) = e^{\beta_0} y_{t-1}^{1+\beta_1} \mathbb{E}(e^{u_t}|y_{t-1})$$

因而条件期望函数为一个指数函数形式，而非线性函数。

条件期望函数形式问题

引力模型

在国际贸易理论中（Head and Mayer, 2014），双边贸易与两个国家的GDP之间存在着被称为“引力模型”的关系，即：

$$X_{ni} = GY_i^a Y_n^b \phi_{ni}$$

其中下标i代表国家，而n代表出口目的地国，X_{ni}为两国之间的贸易额，G为常数，Y为国家的GDP，ϕ_{ni}则是两国之间贸易成本的函数。双边贸易额与GDP之间的关系并非简单的线性关系。

条件期望函数形式问题

解决方案：

- 使用非参数回归（kernel, sieve）
- 机器学习方法
- 引入多项式（平方项、交叉项）：

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 + \beta_6 x_1^3 + \beta_7 x_2^3 + \beta_8 x_1^2 x_2 + \beta_9 x_1 x_2^2 + \cdots + u$$

- 以上方案可能有其缺点，如维数的诅咒（the curse of dimension）

更常用的解决方案——对数据进行变换：

对数变换

对数变换的最常用的变换：

$$x \to \ln(x)$$

进行对数变换的理由：

- 将$[0, +\infty)$变换到$(-\infty, \infty)$上，更符合取值范围的逻辑
- 有偏的分布，如收入、财富等右偏分布，取对数之后可以得到一个近似对称的分布
  - 解释变量和被解释变量都是对称的更符合直觉
  - 一些右偏的分布比较难以线性组合出对称的分布
- 理论预期。如上例中的GDP和出口，变量取对数后都可以变成线性函数关系，这是经济学理论预期的。

对数变换

- 具有弹性（elasticity）解释，经过取对数后，其变化可以解释为百分比变化：

$$d \ln y = \frac{dy}{y}$$

人口、GDP等具有比较平稳的增长率，取对数更容易与其他变量之间满足线性关系。

  - 比如对于GDP：$y_t \propto (1+\beta_1)^t y_0$，取对数后：

$$\ln y_t = C + t \log(1+\beta_1) + \log y_0$$

更容易与其他变量形成线性关系

  - 如果GDP是指数增长，那么：

$$X_{nit} \propto (1+\beta_{i1})^{ta} y_{i0}^a (1+\beta_{n1})^{tb} y_{n0}^b$$

从而出口也类似，取对数后容易与其他变量形成线性关系

对数变换

- 实际上对于一些“比例”型的数据，取对数有时也会有比较好的解释。
- 比如储蓄率例子中，储蓄率$saving_rate = \frac{saving}{income}$，如果我们将其取对数：

$$\ln saving\_rate = \ln saving - \ln income$$

从而如果将之前回归的被解释变量和解释变量取对数，即：

$$\ln saving\_rate_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln income_i + u_i$$

等价于：

$$\ln saving_i - \ln income_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln income_i + u_i$$

- 实际上我们可以证明（练习1.11），以上回归与以下回归是等价的：

$$\ln saving_i = \delta_0 + \delta_1 \cdot \ln income_i + u_i$$

且OLS估计量$\hat{\beta}_0 = \hat{\delta}_0, \hat{\beta}_1 = \hat{\delta}_1 - 1$。

对数变换

- 最后需要注意的是，有些变量可能取到0值，甚至取到负值，取对数时需要格外小心。
  - 需要对收入取对数，然而很多人的收入为0；
  - 需要对净出口取对数，然而净出口可能为负值。
- 如果这些情况样本量比较少，可能是由于数据录入等随机问题导致的，可以直接忽略这些样本，然而更多的情况是这些情况在样本中的比例并不低。

对数变换

- 一些不太严谨的方法可以大概处理这些问题，比如：
  - 对于数据可能为0的问题，我们可以使用$\ln(1+x)$取对数
    - 如此哪些$x=0$的样本取“对数”之后，$\ln(1+0)=0$
    - 且这个变换是一个单调变换

对数变换

- 虽然上述方法被广泛应用，然而这些方法是不严谨的。
  - 原本对数变换的一个优良性质的可以“去量纲”，即不同量纲取对数只差一个常数
    - 例如收入x如果以“万元”为单位，那么$10000x$就是以“元”为单位，取对数后：

$$\ln(10000x) = \ln 10000 + \ln x$$

      两者只差一个常数。
    - 然而如果使用以上$\ln(1+x)$的方法，该“对数”不再有此性质：

$$\ln(1+10000x) - \ln(1+x) = \ln\frac{1+10000x}{1+x} \neq C$$

  - 为何是$\ln(1+x)$而不是$\ln(0.1+x)$或者$\ln(10000+x)$?

对数变换

一些方法也许可以帮助解决这一问题

- 比如如果需要对被解释变量y取对数，我们发现很多的$y=0$:
  - 使用Tobit一类回归，比如第I类Tobit等。
  - 在国际贸易中，Eaton和Tamura（1994）在处理引力模型时，提出可以使用$\ln(a+X_{ni})$作为被解释变量，而将a作为一个待估参数，即ET Tobit（Head和Mayer，2014）。
- 如果需要取对数的变量为解释变量，一个简单的处理方法是定义两个新的变量:

$$\ln x = \begin{cases} \ln x & if\ x>0 \\ 0 & if\ x=0 \end{cases}$$

$$d = 1\{x=0\}$$

从而使用回归:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \ln x_i + \beta_2 d_i + u_i$$

负数的对数变换

一些方法也许可以帮助解决这一问题

- 此外，还有些可以取到负值的变量仍然可能需要使用对数操作。
  - 比如，净出口额、人口净流入等变量
  - 取对数是一个合理的操作，然而负数不可以直接取对数。
- 对于可能为负的变量，一种方法是使用：

$$g(x) = \text{Sign}(x) \cdot \ln(1 + |x|)$$

该变换同样也是单调变换，经过变换后符号仍然不变。

负数的对数变换

或者，也可以使用反双曲正弦函数（如Caprettini和Voth，2023）

- 双曲正弦函数的定义为：

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

  - 以上函数的定义域和值域都是$\mathbb{R}$
  - 当$x \to \infty\,(-\infty)$时，以上函数趋向于$\frac{e^x}{2}\left(-\frac{e^{-x}}{2}\right)$，从而当$|x|$足够大时，以上函数近似于$\frac{e^x}{2}\left(-\frac{e^{-x}}{2}\right)$

- 其反函数为：

$$\operatorname{arsinh}(x) = \ln\left(x + \sqrt{x^2+1}\right)$$

其导函数为：

$$\frac{d\operatorname{arsinh}(x)}{dx} = \frac{1}{\sqrt{x^2+1}}$$

当$|x|$足够大时，以上导函数与$\frac{1}{x}$近似，从而：

$$d\operatorname{arsinh}(x) = \frac{dx}{\sqrt{x^2+1}} \approx \frac{dx}{x}$$

也可以近似解释为百分比变动。

其他变换

其他变换：

- Box-Cox变换（不推荐）：

$$y(\lambda)=\begin{cases}\frac{y^{\lambda}-1}{\lambda} & \lambda\neq 0\\ \ln y & \lambda=0\end{cases}$$

- Logistic逆变换：使用

$$f(x)=\ln\frac{x}{1-x}$$

将$(0,1)$区间上的实数映射到$(-\infty,\infty)$上

- 比如对于储蓄率，我们使用：

$$\ln\frac{saving\_rate_i}{1-saving\_rate_i}=\beta_0+\beta_1\cdot\ln(wealth_i)+u_i$$

从而左边和右边取值范围都是$\mathbb{R}$

条件期望的最优逼近

- 真实的条件期望函数我们是永远无法知道的，不过可以证明，线性回归仍然是条件期望函数的最优线性近似。
- 根据定义：

$$y_i = \mathbb{E}\left(y_i|x_i\right) + u_i$$

而最小二乘法的目标函数可以写为：

$$\begin{aligned}\left(y_i - x_i'\beta\right)^2 &= \left[y_i - \mathbb{E}\left(y_i|x_i\right) + \mathbb{E}\left(y_i|x_i\right) - x_i'\beta\right]^2 \\ &= \left[u_i + \left(\mathbb{E}\left(y_i|x_i\right) - x_i'\beta\right)\right]^2 \\ &= u_i^2 + \left(\mathbb{E}\left(y_i|x_i\right) - x_i'\beta\right)^2 + 2u_i\left(\mathbb{E}\left(y_i|x_i\right) - x_i'\beta\right)\end{aligned}$$

条件期望的线性逼近

由于

$$\mathbb{E}\left[u_i\left(\mathbb{E}\left(y_i|x_i\right)-x_i'\beta\right)\right]=\mathbb{E}\left(\mathbb{E}\left[u_i\left(\mathbb{E}\left(y_i|x_i\right)-x_i'\beta\right)\right]|x_i\right)=0$$

从而：

$$\mathbb{E}\left[\left(y_i-x_i'\beta\right)^2\right]=\mathbb{E}\left(u_i^2\right)+\left(\mathbb{E}\left(y_i|x_i\right)-x_i'\beta\right)^2$$

其中第一项跟β无关，因而最小化$\mathbb{E}\left[\left(y_i-x_i'\beta\right)^2\right]$等价于最小化$\left(\mathbb{E}\left(y_i|x_i\right)-x_i'\beta\right)^2$，即$x_i'\beta_0$是条件期望函数$\mathbb{E}\left(y_i|x_i\right)$在均方误差标准下的最优线性逼近。

变换后的预测

当我们使用y_i的非线性变换时，对于y_i的预测需要额外的关注。根据Jensen不等式，由于：

$$f\left(\mathbb{E}\left(y|x\right)\right) \neq \mathbb{E}\left(f\left(y\right)|x\right)$$

因而

$$\mathbb{E}\left(y|x\right) \neq f^{-1}\left[\mathbb{E}\left(f\left(y\right)|x\right)\right]$$

为了预测y的值，不能先预测$f\left(y\right)$，再使用$f^{-1}\left(\cdot\right)$将其还原。

对数的预测

- 比如，如果我们设定如下方程：

$$\ln y = x'\beta + u$$

使用以上方程，我们得到的实际上是对于条件期望函数：$\mathbb{E}(\ln y|x)$的最优线性估计

- 然而，根据Jensen不等式：

$$\mathbb{E}(\ln y|x) \leq \ln[\mathbb{E}(y|x)]$$

从而：

$$\mathbb{E}(y|x) \geq \exp\{\mathbb{E}(\ln y|x)\}$$

因而如果我们使用$\exp\left(x'\hat{\beta}\right)$对$y$进行预测，会低估$y$的条件期望。

对数的预测

- 注意到：$y = e^{x'\beta}e^{u}$从而：$\mathbb{E}(y|x) = e^{x'\beta}\mathbb{E}(e^{u}|x)$
- 如果假设u和x独立且$u \sim N(0, \sigma^2)$，那么

$$\mathbb{E}(e^{u}|x) = \mathbb{E}(e^{u}) = e^{\sigma^2/2}$$

从而：

$$\mathbb{E}(y|x) = e^{x'\beta + \frac{\sigma^2}{2}}$$

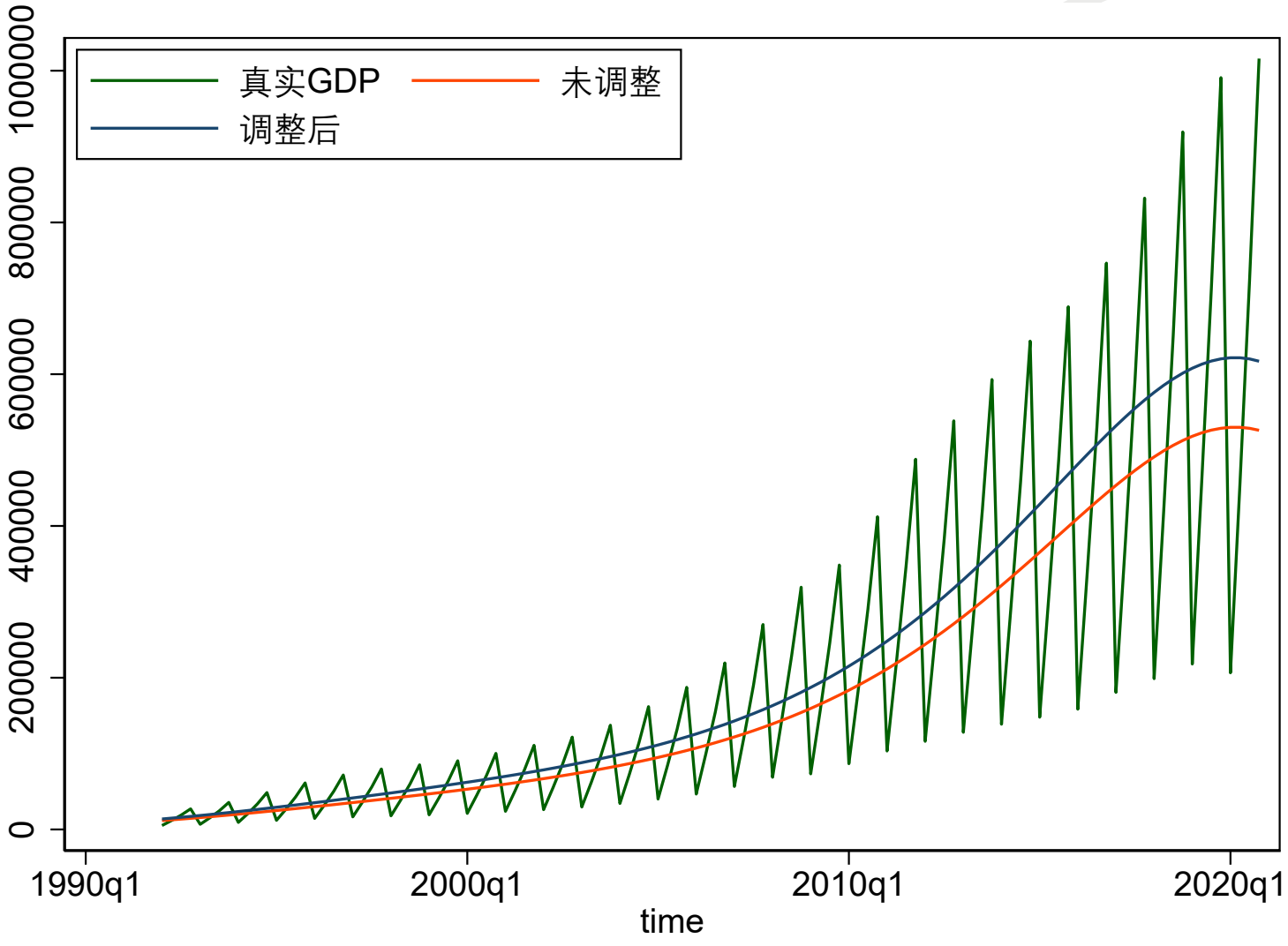
将β和σ^2使用极大似然回归结果，替代即可得到y的条件期望的预测值。

预测GDP

季度GDP的预测

数据集quarterlyGDP.dta中包含了我国的季度GDP数据，为了对以上数据进行预测，我们可以将GDP先取对数，然后使用时间的多项式对其进行一个简单的预测，接下来，我们分别使用$e^{x'\beta}$和$e^{x'\beta+\frac{\sigma^2}{2}}$两种办法对GDP进行了预测（代码：predict_log.do）

预测GDP


真实GDP
未调整
调整后
0
200000
400000
600000
800000
1000000
1990q1
2000q1
2010q1
2020q1
time

分步回归

- 对于总体回归：

$$y_i = x_i'\beta + u_i$$

如果我们将解释变量x_i分为两部分：$x_i = [x_{1i}', x_{2i}']'$，那么总体回归方程可以写为：

$$y_i = x_{i1}'\beta_1 + x_{i2}'\beta_2 + u_i$$

- 如果我们将以上方程两边同时对x_{i2}求条件期望，得到：

$$\begin{aligned}\mathbb{E}(y_i|x_{i2}) &= \mathbb{E}(x_{i1}|x_{i2})'\beta_1 + x_{i2}'\beta_2 + \mathbb{E}(u_i|x_{i2}) \\ &= \mathbb{E}(x_{i1}|x_{i2})'\beta_1 + x_{i2}'\beta_2\end{aligned}$$

在总体回归方程两边同时减去上式，得到：

$$\begin{aligned}y_i - \mathbb{E}(y_i|x_{i2}) &= x_i'\beta + u_i - \mathbb{E}(x_{i1}|x_{i2})'\beta_1 - x_{i2}'\beta_2 \\ &= [x_{i1} - \mathbb{E}(x_{i1}|x_{i2})]'\beta_1 + u_i\end{aligned}$$

分步回归

- 在上式中，$y_i - \mathbb{E}(y_i|x_{i2})$代表$y_i$中$x_{i2}$所不能预测的部分
- 而$x_{i1} - \mathbb{E}(x_{i1}|x_{i2})$代表$x_{i1}$中$x_{i2}$所不能预测的部分
- 因而系数β_1代表的是排除x_{i2}与x_{i1}和y_i的相关性之后，x_{i1}与y_i的净相关性，或者在保持x_{i2}不变的条件下，x_{i1}与y_i的相关性。

分步回归

- 类似的结果对于线性投影也成立：

$$y_i - \mathbb{L}\left(y_i|x_{i2}\right) = \left[x_{i1} - \mathbb{L}\left(x_{i1}|x_{i2}\right)\right]'\beta_1 + u_i$$

- 令$e_{iy} = y_i - \mathbb{L}\left(y_i|x_{i2}\right), e_{i,x_1} = x_{i1} - \mathbb{L}\left(x_{i1}|x_{i2}\right)$，可知

$$\mathbb{E}\left(u_i e_{i,x_1}\right) = \mathbb{E}\left(u_i x_{i1}\right) - \mathbb{E}\left(u_i \mathbb{L}\left(x_{i1}|x_{i2}\right)\right) = 0$$

- 从而相减后得到的式子可以写为：

$$e_{iy} = e'_{i,x_1}\beta_1 + u_i$$

分步回归

为了计算β_1，我们可以通过如下步骤进行计算：

1. 使用对X_1的每一列对X_2做回归，得到残差矩阵$\hat{e}_{X_1}$
2. 使用Y对X_2做回归，得到残差$\hat{e}_y$（对于线性回归，这一步可以省略）
3. 使用$\hat{e}_y$对$\hat{e}_{X_1}$做回归，得到系数$\hat{\beta}_1$

如上的步骤被称为**分步回归**（**partitioned regression**）。

分步回归

Frisch-Waugh-Lovell定理

使用以上分步回归得到的$\hat{\beta}_1$与式：

$$y_i = x'_{i1}\beta_1 + x'_{i2}\beta_2 + u_i$$

的最小二乘回归得到的$\hat{\beta}_1$是完全等价的。

证明见讲义。

分步回归示例

克强指数

为了展示分步回归的步骤，我们使用代码partioned_regression.do复制了“克强指数”，即使用工业用电量新增、铁路货运量新增和银行贷款新增拟合GDP增长，如果直接进行回归，得到的用电量新增的系数约为0.1637，而使用分步回归得到的用电量新增的系数同样为0.1637，两者严格相等。此外，我们还计算了$\hat{e}_y$和$\hat{e}_{x_1}$的相关系数，即偏相关系数，这度量了排除了铁路货运量新增、银行贷款新增的影响后，工业用电量新增与GDP增长的“净相关性”，大约为0.3861，表现了很强的相关性。