

# 25

## Probability Meets Linear Algebra

### 鸡兔同笼 3

鸡兔互变之马尔科夫奇妙夜



我们必须知道，我们终将知道。

*Wir müssen wissen. Wir werden wissen.*

*We must know. We shall know.*

—— 大卫·希尔伯特 (David Hilbert) | 德国数学家 | 1862 ~ 1943



- ▶ `numpy.diag()` 以一维数组的形式返回方阵的对角线元素，或将一维数组转换成对角阵
- ▶ `numpy.linalg.eig()` 特征值分解
- ▶ `numpy.linalg.inv()` 矩阵求逆
- ▶ `numpy.matrix()` 构造二维矩阵
- ▶ `numpy.meshgrid()` 产生网格化数据
- ▶ `numpy.vstack()` 垂直堆叠数组
- ▶ `seaborn.heatmap()` 绘制热图

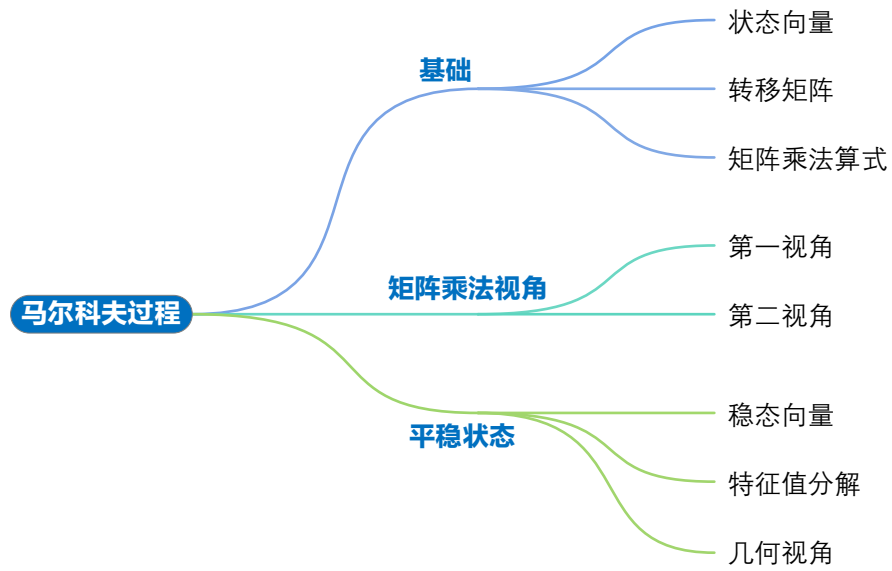
本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：[jiang.visualize.ml@gmail.com](mailto:jiang.visualize.ml@gmail.com)



本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：[jiang.visualize.ml@gmail.com](mailto:jiang.visualize.ml@gmail.com)

## 25.1 鸡兔互变奇妙夜

怪哉，怪哉！

接连数月，村民发现一件奇事——夜深人静时，同笼鸡兔竟然互变！一些小兔变成小鸡，而一些小鸡变成小兔。

村民奔走相告，大家都惊呼，“我们都疯了！”

而一众村民中，农夫则显得处变不惊。在农夫眼里，村里发生的鸡兔互变像极了老子说的“祸兮，福之所倚；福兮，祸之所伏。”

农夫对村民说，“大家不要怕，恐惧都是来自于未知。我们必须知道，我们终将知道！福祸相生，是福不是祸，是祸躲不过。”

面对这个鸡兔互变的怪相，农夫决定用线性代数这个利器探究一番。

### 鸡兔互变过程图

农夫先是连续几日统计村里的鸡兔数量，他有个意想不到的发现——每晚有 30% 的小鸡变成小兔，其他小鸡不变；与此同时，每晚有 20% 小兔变成小鸡，其余小兔不变。变化前后鸡兔总数不变。

他先画了图 1 这幅图，用来描述鸡兔互变的比例。这个比例也就是概率值，即发生变化的可能性。

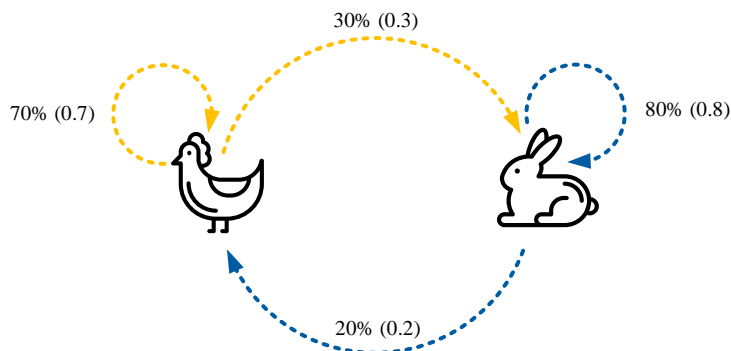


图 1. 鸡兔互变的比例

### 矩阵乘法

农夫想试试用矩阵乘法来描述这一过程。

第  $k$  天，鸡兔的比例用列向量  $\pi(k)$  表示，比如：

$$\boldsymbol{\pi}(k) = \begin{bmatrix} 0.3 \\ 0.7 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $\boldsymbol{\pi}(k)$  第一行元素代表小鸡的比例 (0.3, 30%)， $\boldsymbol{\pi}$  第二行元素代表小兔的比例 (0.7, 70%)。

第  $k+1$  天，鸡兔的比例用列向量  $\boldsymbol{\pi}(k+1)$  表示。鸡兔互变的比例写成方阵  $\boldsymbol{T}$ ，这样  $k \rightarrow k+1$  变化过程可以写成：

$$k \rightarrow k+1: \boldsymbol{T}\boldsymbol{\pi}(k) = \boldsymbol{\pi}(k+1) \quad (2)$$

农夫翻阅线性代数典籍时发现  $\boldsymbol{T}$  和  $\boldsymbol{\pi}$  都有自己专门的名称： $\boldsymbol{T}$  叫转移矩阵 (transition matrix)；列向量  $\boldsymbol{\pi}$  叫做状态向量 (state vector)。

而整个鸡兔互变的过程也有自己的名称——马尔可夫过程 (Markov process)。

## 转移矩阵

鸡兔互变中，转移矩阵  $\boldsymbol{T}$  为：

$$\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 \\ 0.3 & 0.8 \end{bmatrix} \quad (3)$$

图 2 所示为转移矩阵  $\boldsymbol{T}$  每个元素的具体含义。

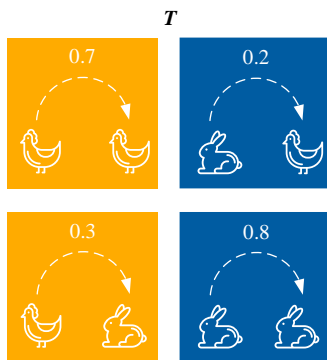


图 2. 转移矩阵  $\boldsymbol{T}$

图 3 所示为用矩阵运算描述  $k \rightarrow k+1$  鸡兔互变过程。

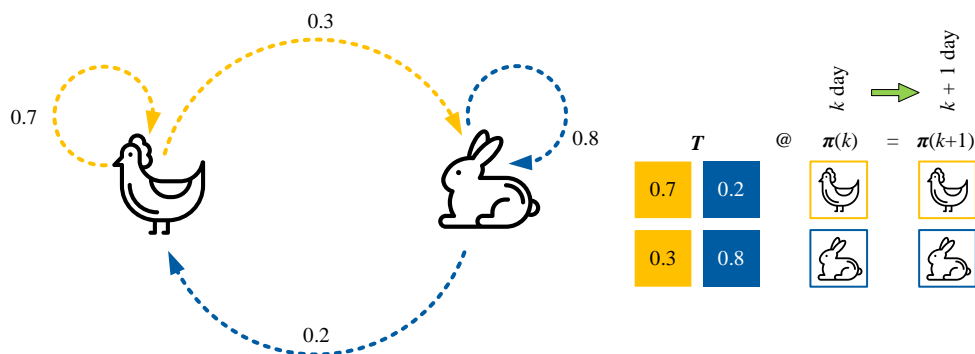


图 3. 用矩阵运算描述鸡兔互变

农夫注意到  $T$  矩阵的每一列概率值相加为 1。也就是，这个  $2 \times 2$  的方阵  $T$  还可以写成：

$$T = \begin{bmatrix} p & q \\ 1-p & 1-q \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中， $p = 0.7$ ， $q = 0.2$ 。

### 代入具体数值

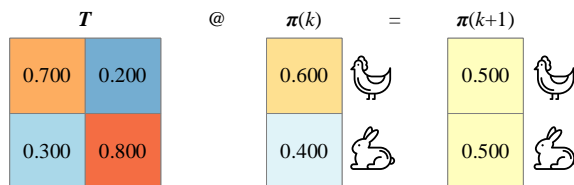
农夫假设，第  $k$  天鸡兔的比例为 60% 和 40%， $\pi(k)$  为：

$$\pi(k) = \begin{bmatrix} 0.6 \\ 0.4 \end{bmatrix} \quad (5)$$

第  $k+1$  天，鸡兔比例为：

$$k \rightarrow k+1: T\pi(k) = \begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 \\ 0.3 & 0.8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.6 \\ 0.4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} = \pi(k+1) \quad (6)$$

农夫想到这一计算可以用热图表达，于是他画了图 4。

图 4. 第  $k$  天  $\rightarrow$  第  $k+1$  天，状态转换运算热图

而第  $k+2$  天状态向量  $\pi(k+2)$  和第  $k+1$  天状态向量  $\pi(k+1)$  关系为：

$$k+1 \rightarrow k+2: T\pi(k+1) = \pi(k+2) \quad (7)$$

联立 (6) 和 (7)，得到第  $k+2$  天状态向量  $\pi(k+2)$  和第  $k$  天状态向量  $\pi(k)$  关系：

$$k \rightarrow k+2: T^2\pi(k) = \pi(k+2) \quad (8)$$

图 5 所示为，第  $k$  天  $\rightarrow$  第  $k+2$  天，状态转换运算热图。

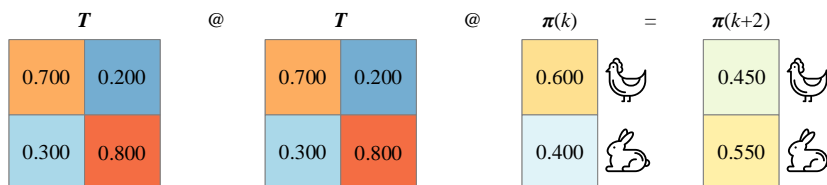


图 5. 第  $k$  天  $\rightarrow$  第  $k+2$  天，状态转换运算热图

### 另一种形式

农夫在查找参考书时发现，也有很多典籍用行向量表达状态向量，即对等式 (2) 左右转置：

$$\pi(k)^T T^T = \pi(k+1)^T \quad (9)$$

这样，(6) 可以写成：

$$\pi(k+1)^T = [0.6 \quad 0.4] \begin{bmatrix} 0.7 & 0.3 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix} = [0.5 \quad 0.5] \quad (10)$$

这种情况，转移矩阵的每一行概率值相加为 1。对应的矩阵运算热图为图 6。

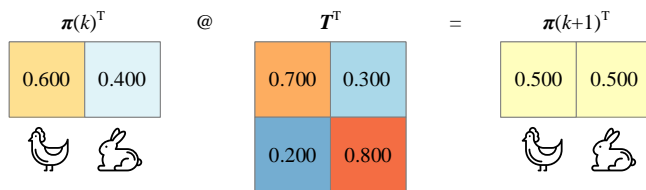


图 6. 第  $k$  天  $\rightarrow$  第  $k+1$  天，状态转换运算热图，注意状态向量为行向量



Bk3\_Ch25\_1.py 计算状态向量转化，并绘制图 4 和图 5 两幅热图。

## 25.2 第一视角：“鸡/兔→鸡”和“鸡/兔→兔”

农夫想到自己学习矩阵乘法时，书上讲过矩阵乘法有两个主要视角。他想先用矩阵乘法第一视角来分析 (2) 矩阵运算式。

他把  $T$  写成两个行向量  $t^{(1)}$  和  $t^{(2)}$  上下叠加，代入 (2) 得到：

$$\begin{bmatrix} t^{(1)} \\ t^{(2)} \end{bmatrix} \pi(k) = \begin{bmatrix} t^{(1)} \pi(k) \\ t^{(2)} \pi(k) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \pi_1(k+1) \\ \pi_2(k+1) \end{bmatrix}}_{\pi(k+1)} \quad (11)$$

### 鸡/兔→鸡

农夫发现只看 (11) 第一行运算的话，它代表的转化是“鸡/兔 → 鸡”，如图 7 所示：

$$\begin{bmatrix} t^{(1)} \end{bmatrix} \pi(k) = \begin{bmatrix} t^{(1)} \pi(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_1(k+1) \end{bmatrix} \quad (12)$$

也就是说，上式代表第  $k$  天的鸡、兔，在第  $k+1$  天变为鸡。

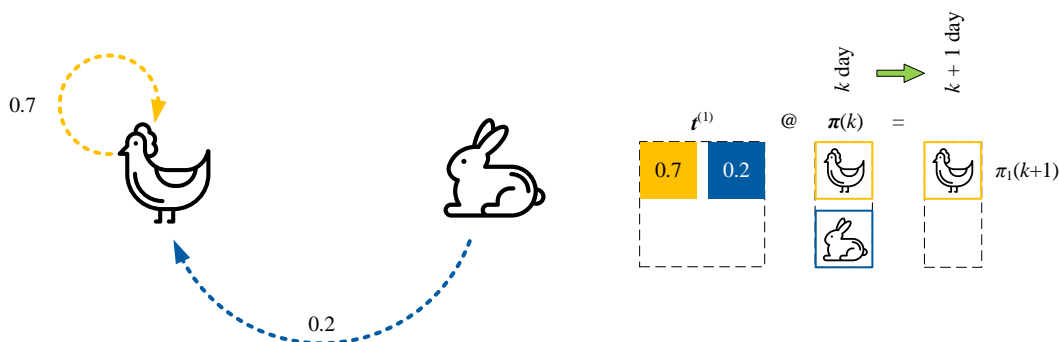
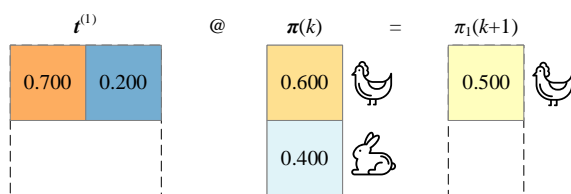


图 7. 鸡/兔→鸡

代入具体值，得到：

$$\begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 \end{bmatrix} @ \underbrace{\begin{bmatrix} 0.6 \\ 0.4 \end{bmatrix}}_{\pi(k)} = \begin{bmatrix} 0.5 \end{bmatrix} \quad (13)$$

第  $k$  天的鸡兔的比例分别为 60% 和 40%，到了  $k+1$  天，鸡的比例为 50%。图 8 所示为上述运算热图。

图 8. 第  $k$  天  $\rightarrow$  第  $k+1$  天, 鸡/兔 $\rightarrow$ 鸡

### 鸡/兔 $\rightarrow$ 兔

图 9 所示为 (11) 第二行运算, 它代表“鸡/兔  $\rightarrow$  兔”。也就是说, 第  $k$  天的鸡、兔, 第  $k+1$  天变为兔:

$$\begin{bmatrix} t^{(2)} \end{bmatrix} \pi(k) = \begin{bmatrix} t^{(2)} \pi(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_2(k+1) \end{bmatrix} \quad (14)$$

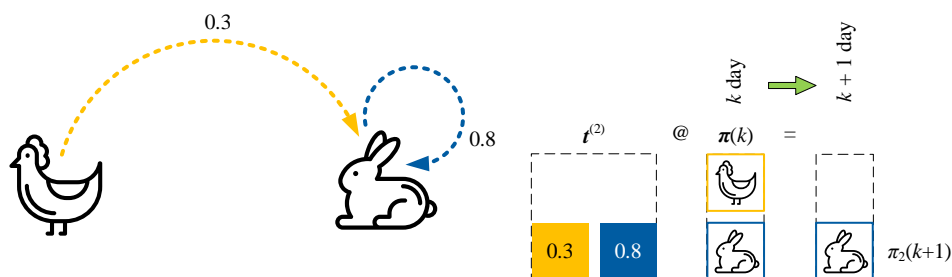
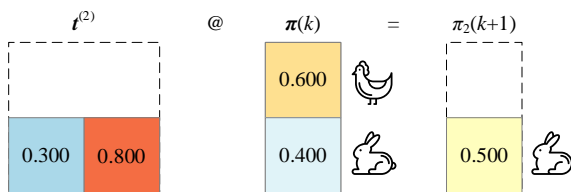
图 9. 鸡/兔  $\rightarrow$  兔

图 10 所示为第  $k$  天的鸡兔的比例分别为 60% 和 40%, 到了  $k+1$  天, 兔的比例也为 50%:

$$\begin{bmatrix} 0.3 & 0.8 \end{bmatrix} @ \begin{bmatrix} 0.6 \\ 0.4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$\pi(k)$

图 10. 第  $k$  天  $\rightarrow$  第  $k+1$  天, 鸡/兔 $\rightarrow$ 鸡

这就是利用矩阵乘法第一视角来分析状态转化运算。



## 25.3 第二视角：“鸡→鸡/兔”和“兔→鸡/兔”

农夫继续用矩阵乘法第二视角分析 (2) 矩阵运算式。

他将转移矩阵  $T$  写成左右排列列向量  $t_1$  和  $t_2$ ，代入 (2) 展开得到：

$$\underbrace{\begin{bmatrix} t_1 & t_2 \end{bmatrix}}_T \underbrace{\begin{bmatrix} \pi_1(k) \\ \pi_2(k) \end{bmatrix}}_{\pi(k)} = \pi_1(k)t_1 + \pi_2(k)t_2 = \underbrace{\begin{bmatrix} \pi_1(k+1) \\ \pi_2(k+1) \end{bmatrix}}_{\pi(k+1)} \quad (16)$$

其中， $\pi_1$  代表鸡的比例， $\pi_2$  代表兔的比例。

矩阵乘法第二视角将矩阵乘法  $T\pi(k) = \pi(k+1)$  转化为矩阵加法  $\pi_1(k)t_1 + \pi_2(k)t_2$ 。农夫考虑分别分析  $\pi_1(k)t_1$  和  $\pi_2(k)t_2$  代表的具体含义。

(16) 这个式子让农夫看着头大，他决定代入具体鸡兔数值。

### 鸡→鸡/兔

假设第  $k$  天，鸡兔的比例仍为 60%、40%：

$$\pi(k) = \begin{bmatrix} \pi_1(k) \\ \pi_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.6 \\ 0.4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

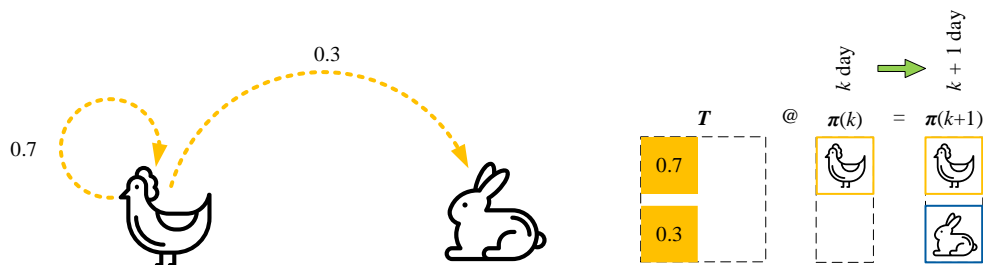
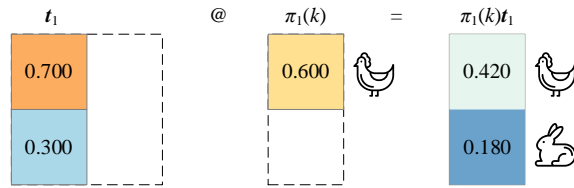


图 11. 鸡→鸡/兔

如图 11 所示， $\pi_1(k)t_1$  代表“鸡 → 鸡/兔”。第  $k$  天，鸡的比例为 0.6，这些鸡在第  $k+1$  天变成占总体比例 0.42 的鸡和 0.18 的兔：

$$\pi_1(k)t_1 = 0.6 \times \begin{bmatrix} 0.7 \\ 0.3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.42 \\ 0.18 \end{bmatrix} \quad (18)$$

图 12 所示为 (18) 运算热图。

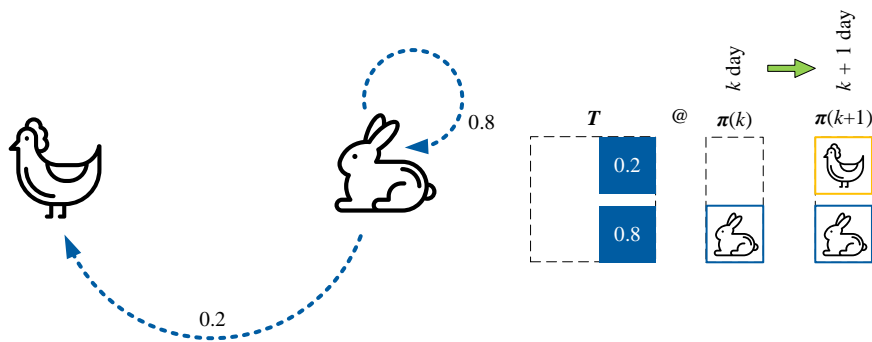
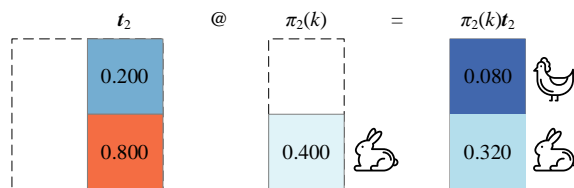
图 12. 第  $k$  天  $\rightarrow$  第  $k+1$  天, 鸡 $\rightarrow$ 鸡/兔

### 兔 $\rightarrow$ 鸡/兔

如图 13 所示,  $\pi_2(k)t_2$  代表“兔  $\rightarrow$  鸡/兔”。第  $k$  天, 兔的比例为 0.4, 这些兔在第  $k+1$  天变成占总体比例 0.08 的鸡和 0.32 的兔:

$$\pi_2(k)t_2 = 0.4 \times \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.08 \\ 0.32 \end{bmatrix} \quad (19)$$

图 14 热图对应上述运算。

图 13. 兔 $\rightarrow$ 鸡/兔图 14. 第  $k$  天  $\rightarrow$  第  $k+1$  天, 兔 $\rightarrow$ 鸡/兔

如图 15 热图所示, 将 (18) 和 (19) 相加, 得到第  $k+1$  天状态向量  $\pi(k+1)$ :

$$\pi(k+1) = \begin{bmatrix} 0.42 \\ 0.18 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.08 \\ 0.32 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.5 \end{bmatrix} \quad (20)$$

|               |   |               |   |            |
|---------------|---|---------------|---|------------|
| $\pi_1(k)t_1$ | + | $\pi_2(k)t_2$ | = | $\pi(k+1)$ |
| 0.420         |   | 0.080         |   | 0.500      |
| 0.180         |   | 0.320         |   | 0.500      |

图 15. 第  $k$  天  $\rightarrow$  第  $k+1$  天, 鸡/兔  $\rightarrow$  鸡/兔

这就是利用矩阵乘法第二视角来分析状态转化运算。

## 25.4 连续几夜鸡兔转换

农夫把自己所学所想和村民分享后, 大家都觉得线性代数有趣, 认为农夫的分析有道理。大家纷纷加入农夫成立的“线代探秘小组”, 学线代、用线代, 并继续探究鸡兔互变这个疑难杂症。

有“线代探秘小组”成员发现, 虽然连日来各家鸡兔互变没有停止, 但是全村的鸡兔比例似乎达到了某种平衡。真是丈二和尚摸不着头脑!

农夫想用线性代数方法来看看连续几晚鸡兔互变有何有趣特征。

第 0 天, 为初始状态, 记做  $\pi(0)$ 。

第 1 天, 状态向量  $\pi(1)$  为:

$$0 \rightarrow 1: T\pi(0) = \pi(1) \quad (21)$$

第 2 天, 状态向量  $\pi(2)$  和  $\pi(0)$  关系为:

$$0 \rightarrow 2: T\pi(1) = T^2\pi(0) = \pi(2) \quad (22)$$

第 3 天, 状态向量  $\pi(3)$  和  $\pi(0)$  关系为:

$$0 \rightarrow 3: T\pi(2) = T^3\pi(0) = \pi(3) \quad (23)$$

这样  $0 \rightarrow k+1$  变化过程可以写成:

$$0 \rightarrow k: T^k\pi(0) = \pi(k) \quad (24)$$

### 12 夜

农夫想算算连续 12 夜, 在不同鸡兔初始比例状态  $\pi(0)$  条件下, 鸡兔达到平衡时比例特点。

图 16 所示的五种情况为鸡的初始比例更高，经过连续 12 夜的变化，农夫发现鸡兔的比例都达到了 40%、60%，也就是 4:6。

这个结果让农夫和“线代探秘小组”组员都眼前一亮！

而图 17 对应的一种情况是，鸡兔的初始比例相同，都是 50%；12 夜之后，鸡兔比例还是 40%、60%。

图 18 所示的五种情况是，初始状态  $\pi(0)$  时，兔的比例更高。有趣的是，12 夜之后，鸡兔比例最终还是达到 40%、60%。

农夫觉得可以初步得出结论，在给定的转移矩阵  $T$  前提下，不管鸡兔初始比例  $\pi(0)$  如何，结果都达到了一定的平衡，也就是：

$$T\pi = \pi$$
(25)

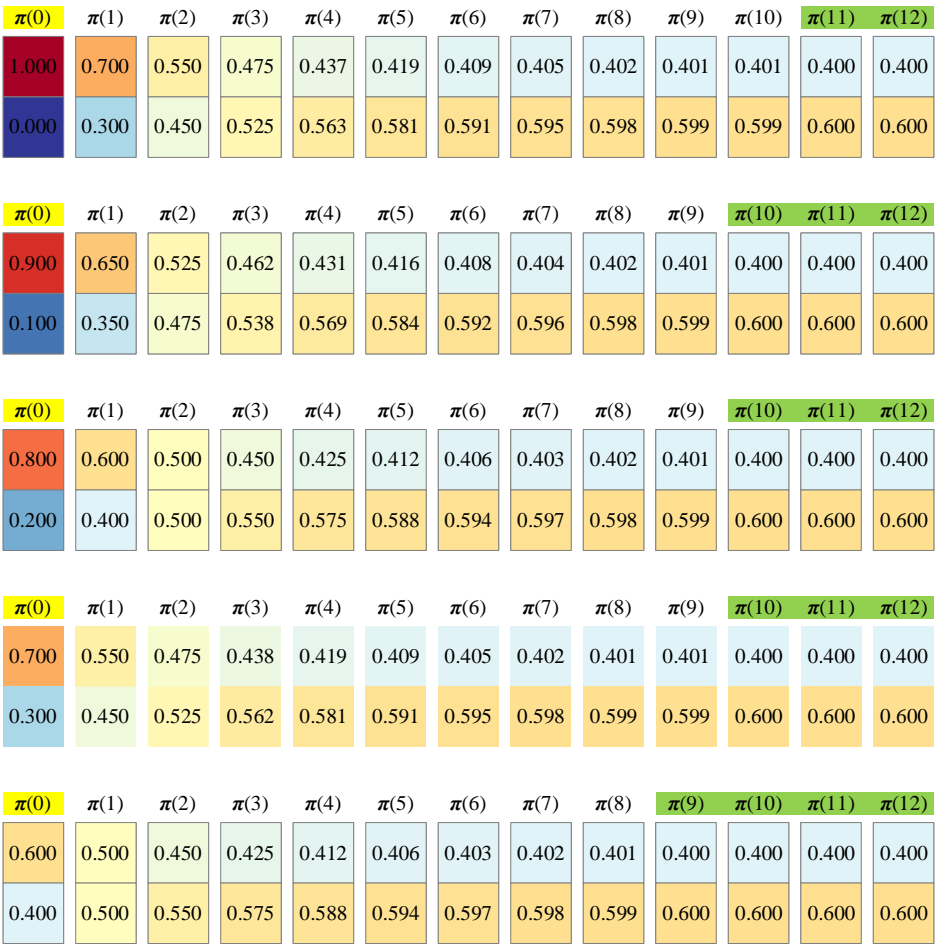


图 16. 连续 12 夜鸡兔互变比例，鸡的初始比例更高

| $\pi(0)$ | $\pi(1)$ | $\pi(2)$ | $\pi(3)$ | $\pi(4)$ | $\pi(5)$ | $\pi(6)$ | $\pi(7)$ | $\pi(8)$ | $\pi(9)$ | $\pi(10)$ | $\pi(11)$ | $\pi(12)$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.500    | 0.450    | 0.425    | 0.412    | 0.406    | 0.403    | 0.402    | 0.401    | 0.400    | 0.400    | 0.400     | 0.400     | 0.400     |
| 0.500    | 0.550    | 0.575    | 0.588    | 0.594    | 0.597    | 0.598    | 0.599    | 0.600    | 0.600    | 0.600     | 0.600     | 0.600     |

图 17. 连续 12 夜鸡兔互变比例，鸡和兔的初始比例一样高

| $\pi(0)$ | $\pi(1)$ | $\pi(2)$ | $\pi(3)$ | $\pi(4)$ | $\pi(5)$ | $\pi(6)$ | $\pi(7)$ | $\pi(8)$ | $\pi(9)$ | $\pi(10)$ | $\pi(11)$ | $\pi(12)$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.400    | 0.400    | 0.400    | 0.400    | 0.400    | 0.400    | 0.400    | 0.400    | 0.400    | 0.400    | 0.400     | 0.400     | 0.400     |
| 0.600    | 0.600    | 0.600    | 0.600    | 0.600    | 0.600    | 0.600    | 0.600    | 0.600    | 0.600    | 0.600     | 0.600     | 0.600     |

| $\pi(0)$ | $\pi(1)$ | $\pi(2)$ | $\pi(3)$ | $\pi(4)$ | $\pi(5)$ | $\pi(6)$ | $\pi(7)$ | $\pi(8)$ | $\pi(9)$ | $\pi(10)$ | $\pi(11)$ | $\pi(12)$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.300    | 0.350    | 0.375    | 0.387    | 0.394    | 0.397    | 0.398    | 0.399    | 0.400    | 0.400    | 0.400     | 0.400     | 0.400     |
| 0.700    | 0.650    | 0.625    | 0.613    | 0.606    | 0.603    | 0.602    | 0.601    | 0.600    | 0.600    | 0.600     | 0.600     | 0.600     |

| $\pi(0)$ | $\pi(1)$ | $\pi(2)$ | $\pi(3)$ | $\pi(4)$ | $\pi(5)$ | $\pi(6)$ | $\pi(7)$ | $\pi(8)$ | $\pi(9)$ | $\pi(10)$ | $\pi(11)$ | $\pi(12)$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.200    | 0.300    | 0.350    | 0.375    | 0.387    | 0.394    | 0.397    | 0.398    | 0.399    | 0.400    | 0.400     | 0.400     | 0.400     |
| 0.800    | 0.700    | 0.650    | 0.625    | 0.613    | 0.606    | 0.603    | 0.602    | 0.601    | 0.600    | 0.600     | 0.600     | 0.600     |

| $\pi(0)$ | $\pi(1)$ | $\pi(2)$ | $\pi(3)$ | $\pi(4)$ | $\pi(5)$ | $\pi(6)$ | $\pi(7)$ | $\pi(8)$ | $\pi(9)$ | $\pi(10)$ | $\pi(11)$ | $\pi(12)$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.100    | 0.250    | 0.325    | 0.362    | 0.381    | 0.391    | 0.395    | 0.398    | 0.399    | 0.399    | 0.400     | 0.400     | 0.400     |
| 0.900    | 0.750    | 0.675    | 0.638    | 0.619    | 0.609    | 0.605    | 0.602    | 0.601    | 0.601    | 0.600     | 0.600     | 0.600     |

| $\pi(0)$ | $\pi(1)$ | $\pi(2)$ | $\pi(3)$ | $\pi(4)$ | $\pi(5)$ | $\pi(6)$ | $\pi(7)$ | $\pi(8)$ | $\pi(9)$ | $\pi(10)$ | $\pi(11)$ | $\pi(12)$ |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.000    | 0.200    | 0.300    | 0.350    | 0.375    | 0.388    | 0.394    | 0.397    | 0.398    | 0.399    | 0.400     | 0.400     | 0.400     |
| 1.000    | 0.800    | 0.700    | 0.650    | 0.625    | 0.613    | 0.606    | 0.603    | 0.602    | 0.601    | 0.600     | 0.600     | 0.600     |

图 18. 连续 12 夜鸡兔互变比例，兔的初始比例更高

## 求解平衡状态

农夫把 (25) 代入 (4)，得到：

$$\begin{bmatrix} p & q \\ 1-p & 1-q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

另外，状态向量本身元素相加为 1，由此农夫得到两个等式：

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：[jiang.visualize.ml@gmail.com](mailto:jiang.visualize.ml@gmail.com)

$$\begin{cases} p\pi_1 + q\pi_2 = \pi_1 \\ \pi_1 + \pi_2 = 1 \end{cases} \quad (27)$$

求解二元一次线性方程组得到：

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{q}{1-p+q} \\ \pi_2 = \frac{1-p}{1-p+q} \end{cases} \quad (28)$$

农夫记得他假设  $p = 0.7$ ,  $q = 0.2$ , 代入 (28) 得到：

$$\begin{cases} \pi_1 = 0.4 \\ \pi_2 = 0.6 \end{cases} \quad (29)$$

也就鸡兔互变平衡时，稳态向量  $\pi$  为：

$$\pi = \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.6 \end{bmatrix} \quad (30)$$

这和农夫之前做的模拟实验结果完全一致！真可谓“山重水复疑无路，柳暗花明又一村。”

也就是说， $T$  乘上 (30) 中的稳态向量  $\pi$ ，结果还是稳态向量  $\pi$ ：

$$T\pi = \pi \Rightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} 0.7 & 0.2 \\ 0.3 & 0.8 \end{bmatrix}}_T \underbrace{\begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.6 \end{bmatrix}}_{\pi} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.6 \end{bmatrix}}_{\pi} \quad (31)$$

农夫突然记起这就是前几日他读到的特征值分解 (eigen decomposition)！书上反复提到特征值分解的重要性，农夫今天也见识到这个数学利器的伟力。



Bk3\_Ch25\_2.py 绘制本节 11 幅热图。



在 Bk3\_Ch25\_2.py 基础上，我们做了一个 App 用热图展示不同的初始状态到稳态向量的演变过程。请参考 Streamlit\_Bk3\_Ch25\_2.py。

## 25.5 有向量的地方，就有几何

农夫学习线性代数时，总结了几句真经。其中一句就是——有向量的地方，就有几何。

他决定透过几何这个视角来看看状态向量的变化。

农夫把图 16、图 17、图 18 对应的 11 种状态向量的初始值画在平面直角坐标系中，用“有方向的线段”代表具体向量数值。

在他画的图 19 这 11 幅子图中，紫色向量代表鸡兔初始比例状态  $\pi(0)$ ，红色向量代表经过 12 夜鸡兔互变后  $\pi(12)$  的位置。

农夫发现不管初始比例状态  $\pi(0)$  如何，也就是紫色向量位于任何方位，经过 12 夜持续变化，红色向量  $\pi(12)$  的位置几乎完全一致。

特别地，如图 19 (g) 所示，当初始比例  $\pi(0)$  就是稳态向量时：

$$\pi(0) = \begin{bmatrix} 0.4 \\ 0.6 \end{bmatrix} \quad (32)$$

转移矩阵  $T$  没有改变  $\pi(0)$  的方向。农夫查阅典籍发现，这个向量也有自己的名字，它叫做  $T$  的特征向量 (eigenvector)。

而且，他发现变化过程，向量终点都落在一条直线上。这条直线代表——鸡、兔比例之和为 1。

农夫在图 19 中还画了另外一组向量，这些向量都是单位向量 (unit vector)，对应：

$$\frac{\pi}{\|\pi\|} \quad (33)$$

这一组向量终点都落在单位圆上，因为它们的模都是 1。

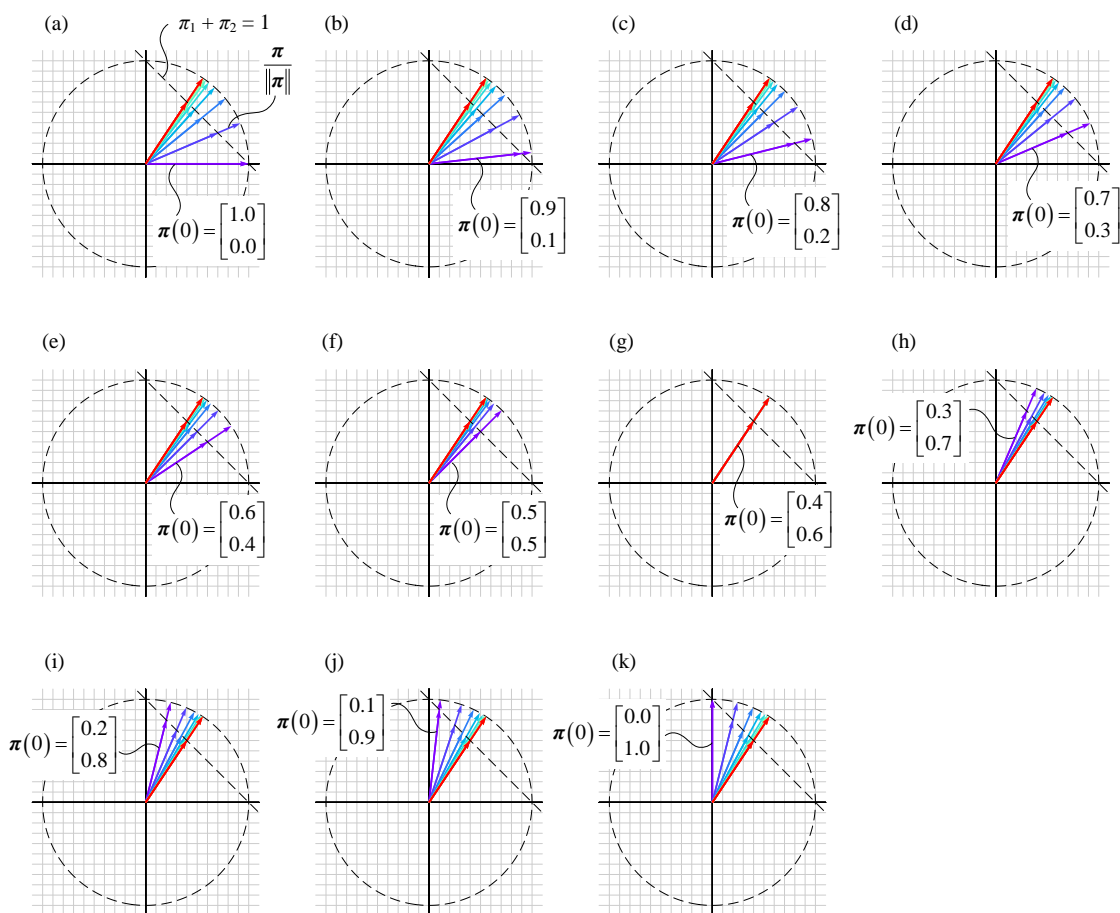


图 19. 连续 12 夜鸡兔互变比例，几何视角



Bk3\_Ch25\_3.py 绘制图 19。



在 Bk3\_Ch25\_3.py 基础上，我们做了一个 App 用箭头图展示不同的初始状态到稳态向量的演变过程。请参考 Streamlit\_Bk3\_Ch25\_3.py。

## 25.7 彩蛋

至此，小村村民心中一块大石头算是落地了。对于“鸡兔互变”这个奇事，大伙儿也都见怪不怪了！

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：[jiang.visualize.ml@gmail.com](mailto:jiang.visualize.ml@gmail.com)



前后脚的事儿，村民发现鸡兔互变也停了。笑容在大伙儿脸上绽开，农夫把全村老少都邀到自家菜园，要好好欢庆一番！

大伙儿都没闲着，摘果蔬，网肥鱼，蒸米饭，取美酒，摆桌椅，嘉宾纷沓，鼓瑟吹笙，烹羊宰牛且为乐，会须一饮三百杯 ...

这阵仗吓坏了的一笼鸡兔，它们蜷缩一团，瑟瑟发抖。农夫见状，撸着一只毛绒兔耳朵说，“你们这次立了大功，留着过年吧！”

欢言酌春酒，摘我园中蔬。微雨从东来，好风与之俱。

## 变与不变

---

书到用时方恨少，腹有诗书气自华，农夫这次让大伙儿理解了这两句话的精髓。

经过这场线性代数风暴之后，小村村民白天田间耕作时都会怀揣一本数学典籍，一得片刻休息，大伙儿分秒必争、手不释卷。夜深人静时，焚膏继晷、挑灯夜读者甚多。学数学，用数学，成了小村新风尚。

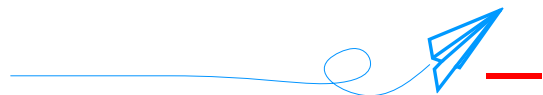
大伙儿似乎也不再惧怕未知，因为“我们必须知道，我们终将知道。”

渐渐地，这个曾经与世隔绝的小村处处都在变化，村民们也都肉眼可见地变化。你让我说，小村和村民哪里发生了变化？我也说不上。反正，时时刻刻都在变化，感觉一切都在变得更好。

而不变的是，小村还是那个小村，村民还是咱们这五十几户村民。

云山青青，凤泉泠泠。山色依旧可爱，泉声更是可听。

(镜头拉远拉高) 一川松竹任横斜，有人家，被云遮。



东风升，云雾腾。

紫气东来，祥云西至。

鸡兔同笼引发的思想风暴，似乎给这个沉睡数百年的村庄带了什么，也似乎带走了什么。

好像什么都没有发生，又好像要发生什么。

往时曾发生的，来日终将发生。