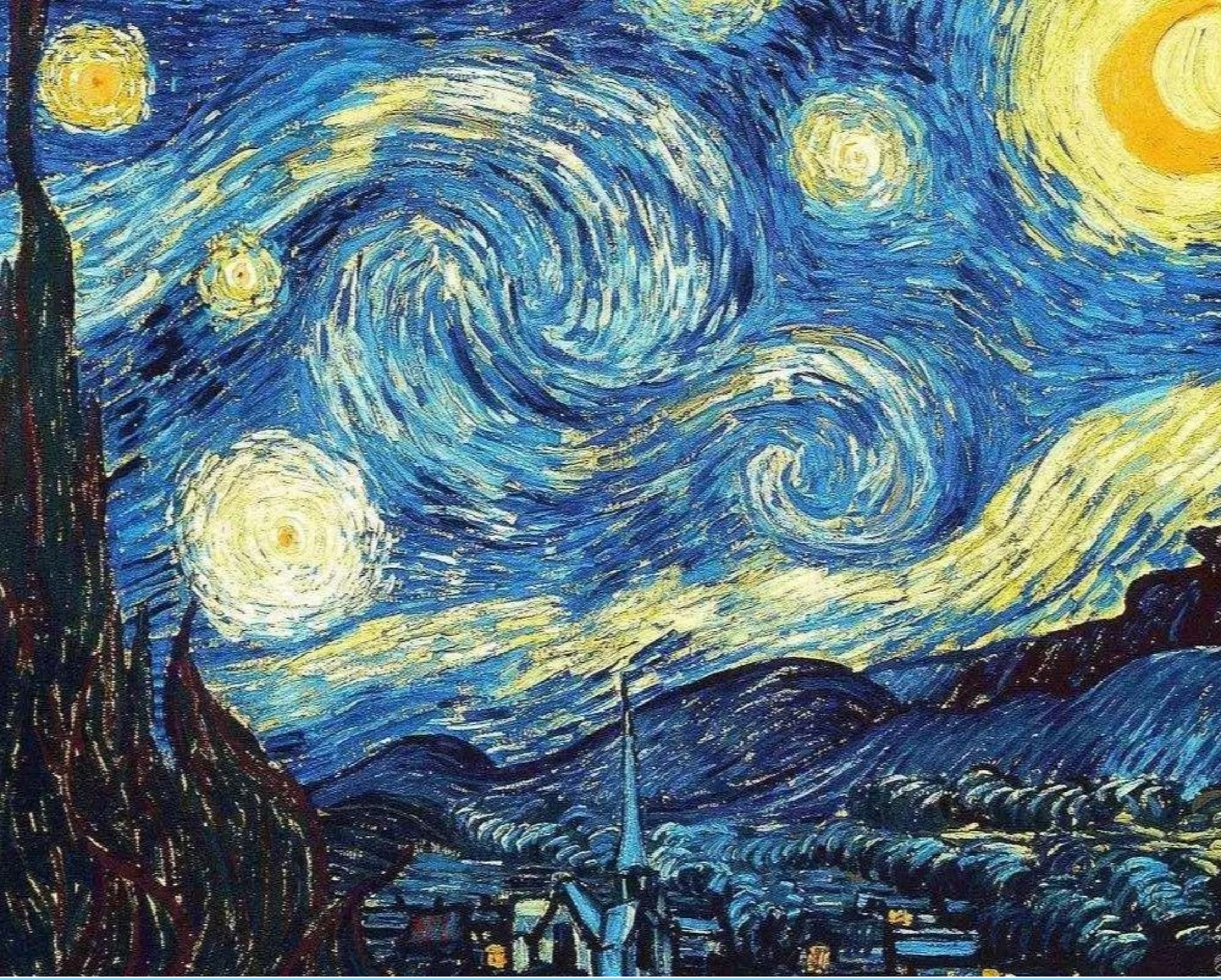


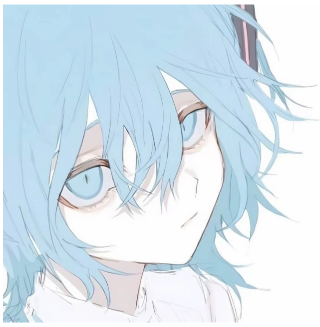
Actuarial Sciences Review

作者：Lollins

组织：安徽师范大学数学与统计学院

时间：July 1, 2024

邮箱：jieyu8258@gmail.com



唯有热爱可抵岁月长！

前言

由于 king 哥已经制作好了一份精美且完整的精算学 pdf 电子笔记, 若我再做精算学上课笔记, 实乃多余. 故我决定做一份精算学复习资料, 主要是对精算学的一些重要知识点进行总结[1], 以便大家复习使用.

当然本笔记只是 king 哥电子笔记的简略版, 会有很多不完善且内容不全的地方, 所以本笔记的内容也仅仅只到达了能让大家通过期末考试的水平, 如果想要高分通过这门课, 强烈建议爆肝 king 哥的电子笔记!!!!

在这里, 愿大家都能顺利通过这学期的各门考试, 也祝大家顺利毕业, 前程似锦, 来年都能收到心仪高校的录取通知书!

Lollins
July 1, 2024

[1] 本文不涉及一些细节上证明以及推导, 想了解公式由来的读者直接阅读 king 哥群里的 pdf 即可.

目录

期末复习相关内容

精算学的主要内容

1. 你能活多久?(生存分布)
2. 你死的时候, 保险公司支付你 1 元, 这 1 元的现值为多少?(人寿保险)
3. 在你活着时, 保险公司每年支付你 1 元, 这些支付的现值是多少?(生存年金)
4. 上述的寿险与生存年金, 你该向保险公司缴纳多少保费?(保费理论)
5. 保险公司为了保证支付, 要准备多少钱?(准备金理论)

题型

1. 填空题: $5 \times 3 = 15$ 分; (年金与寿险的关系, UDD 假设关系)
2. 分析题: $3 \times 7 = 21$ 分; (解释含义)
3. 简答题: $3 \times 4 = 12$ 分; (生存年金分类, 第四章与第五章的一些定义)
4. 计算题: $4 \times 10 = 40$ 分; (前四章一章一题)
5. 综合题: $1 \times 12 = 12$ 分. (重点复习第五章的例题)

第 1 章 生存分布

1.1 新生儿的生存分布

定义 1.1 (生存函数)

称 $s(t) := P(X > t), t > 0$ 为 X 的生存函数.

推论 1.1

$s(t) = 1 - F(t), s'(t) = -f(t)$.

定义 1.2 (死亡力函数)

称 $\mu(t) := -\frac{s'(t)}{s(t)}, t \geq 0$ 为新生儿的死亡力函数.

推论 1.2

关于 $\mu(t), s(t)$ 及 $f_X(t)$ 有如下结论:

1. $\mu(t) = -\frac{s'(t)}{s(t)} = \frac{f_X(t)}{1-F_X(t)} = \frac{f_X(t)}{s(t)}$;
2. $f_X(t) = \mu(t)s(t)$;
3. $s(t) = e^{-\int_0^t \mu(s)ds}$.

注

1. 由 $s(t) = e^{-\int_0^t \mu(s)\mathrm{d}s}$ 及 $\mu(t) = -\frac{s'(t)}{s(t)}$ 可知, 生存函数 $s(t)$ 与死亡力函数 $\mu(t)$ 相互唯一确定.
2. 一个函数 $\mu(t)$ 要作为死亡力, 必须满足以下两条:
   (a). $\mu(t) \geq 0, \ \forall t \geq 0$ (保证 $s(t)$ 单调递减).
   (b). $\int_0^\infty \mu(t)\mathrm{d}t = \infty$(保证 $s(\infty) = 0$).

例题 1.1 假设新生儿的寿命服从以 λ 为参数的指数分布, 则密度函数 $f_X(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \ t > 0$.

解 分布函数 $F_X(t) = \int_0^t f_X(s)ds = 1 - e^{-\lambda t}, t > 0$.

生存函数 $s(t) = 1 - F_X(t) = e^{-\lambda t}, t > 0$. 故其死亡力函数为

$$\mu(t) = -\frac{s'(t)}{s(t)} = -\frac{-\lambda e^{-\lambda t}}{e^{\lambda t}} \equiv \lambda. \tag{1.1}$$

注 由(1.1)式可知, 若新生儿寿命服从以 λ 为参数的指数分布, 则死亡力 $\mu(t) \equiv \lambda$, 和 t 无关. 这表示新生儿的死亡力在任何时候都是一样的. 也就是说, 新生儿永远年轻. 这当然与实际情况不符. 所以, 指数分布作为寿命分布是有缺陷的. 但由于指数分布的计算较为简单, 所以在理论研究中, 学者们很多时候都采用指数分布作为寿命分布.

定义 1.3 (整数年龄与分数年龄)

很多时候, 保险金都是在整数时刻支付的. 所以有必要研究整数年龄和分数年龄. 设 $K(0)$ 为 X 的整数部分, $S(0)$ 为 X 的分数部分. 即

$$X = K(0) + S(0).$$

记 $\mathring{e}_0 = E(X)$, 它表示新生儿的期望寿命; 记 $e_0 = E(K(0))$, 它表示期望整数寿命. 易知

$$e_0 \leq \mathring{e}_0 < e_0 + 1.$$

引理 1.1

设随机变量 X 的 n 阶矩存在, 即 $E(X^n) < \infty$, 则 $\lim_{M\to\infty} M^n s(M) = 0$.

推论 1.3

如下结论成立:

1. $\mathring{e}_0 = E(X) = \int_0^\infty s(t)\mathrm{d}t$;
2. $E(X^2) = \int_0^\infty 2ts(t)\mathrm{d}t$;
3. $E(K(0)^2) = \sum_{n=1}^\infty (2n-1)s(n)$;
4. $e_0 = E(K(0)) = \sum_{n=1}^\infty s(n)$.

注 $E(X^n) = \int_0^\infty nt^{n-1}s(t)\mathrm{d}t$.

1.2 x 岁个体的生存分布

定义 1.4 (x 岁个体余命的分布、密度及生存函数)

将一个 x 岁还活着的个体记为 (x). 个体 (x) 的余命记为 $T(x)$, 显然有 $T(x) = X - x$.
记 $F_{T(x)}(t)$ 为 $T(x)$ 的分布函数, $f_{T(x)}(t)$ 为 $T(x)$ 的密度函数, 则

$$F_{T(x)}(t) = 1 - \frac{s(x+t)}{s(x)}, \quad f_{T(x)}(t) = -\frac{s'(x+t)}{s(x)}.$$

称 $s_{T(x)}(t) := P(T(x) > t)$ 为个体 (x) 的的生存函数.

定义 1.5 (x 岁个体的死亡力)

称 $\mu_x(t) = -\frac{s'_{T(x)}(t)}{s_{T(x)}(t)}$ 为 x 岁个体在 t 年后的死亡力函数.

推论 1.4

我们有

1. $s_{T(x)}(t) = 1 - F_{T(x)}(t) = \frac{s(x+t)}{s(x)}$;
2. $\mu_x(t) = \frac{f_{T(x)}(t)}{1-F_{T(x)}(t)} = \frac{f_{T(x)}(t)}{s_{T(x)}(t)} = -\frac{s'_{T(x)}(t)}{s_{T(x)}(t)}$.
3. $f_{T(x)}(t) = s_{T(x)}(t)\mu_x(t)$;
4. $\mu_x(t) = \mu(x+t)$;
5. $s_{T(x)}(t) = e^{-\int_0^t \mu_x(s)ds} = e^{-\int_0^t \mu(x+s)ds} = e^{-\int_x^{x+t} \mu(s)ds}$.

注 理论上, 一个人一旦出生, 其死亡力就“注定”了. 如果他在 x 岁还活着, 在 t 年后他变为 $x+t$ 岁, 此时他的死亡力是 $\mu_x(t)$. 换一种观点, 如果站在 0 时刻 (他出生时) 看, 他在 $x+t$ 岁的死亡力应为 $\mu(x+t)$. 故有

$$\mu_x(t) = \mu(x+t).$$

例题 1.2 设新生儿的寿命服从以 $\lambda > 0$ 为参数的指数分布. 则 $s(t) = e^{-\lambda t}, t > 0$.

解 从而有

$$\begin{aligned}
F_{T(x)}(t) &= 1 - \frac{s(x+t)}{s(x)} = 1 - \frac{e^{-\lambda(x+t)}}{e^{-\lambda x}} = 1 - e^{-\lambda t} = F_X(t);\\
f_{T(x)}(t) &= F'_{T(x)}(t) = F'_X(t) = f_X(t);\\
\mu_x(t) &= \mu(x+t) \equiv \lambda.
\end{aligned}$$

以上计算再次表明, 在指数分布寿命假设下, 新生儿的的寿命 X 与 x 岁的个体的余命 $T(x)$ 的分布相同. 进一步说明指数分布作为寿命分布是有缺陷的.

命题 1.1

$\forall u,t>0$, 有

$$P(T(x)>t+u|T(x)>t)=P(T(x+t)>u). \tag{1.2}$$

该式的含义为: 一个 x 岁的人, 在 $x+t$ 岁还活着的条件下, 再活 u 年不死的概率与一个 $x+t$ 岁的人在 u 年内未死的概率相等.

注由(1.2)式立即可得

$$P(T(x)\le t+u|T(x)>t)=P(T(x+t)\le u). \tag{1.3}$$

例题 1.3 设新生儿的寿命服从指数分布, 参数为 λ.

解 我们有 $\mu(t)\equiv\lambda$, 且

$$\begin{aligned}
&s(t)=e^{-\lambda t},t>0.\\
&F_{T(x)}=1-\frac{s(x+t)}{s(x)}=1-e^{-\lambda t}=F_X(t).\\
&f_{T(x)}(t)=F'_{T(x)}(t)=\lambda e^{-\lambda t}=f_X(t),t>0.\\
&s_{T(x)}(t)=\frac{s(x+t)}{s(x)}=e^{-\lambda t}=s(t),t>0.\\
&\mu_x(t)=\mu(x+t)\equiv\mu,t>0.\\
&e_x=\sum_{k=1}^{\infty}{}_kp_x=\sum_{k=1}^{\infty}e^{-\lambda k}=\frac{e^{-\lambda}}{1-e^{-\lambda}}.\\
&\mathring{e}_x=\int_0^{\infty}{}_tp_x dt=\int_0^{\infty}e^{-\lambda t}dt=\frac{1}{\lambda}.
\end{aligned}$$

显而易见, 这里的 $\mathring{e}_x$ 和 e_x 与 x 无关, 也就是说, 所有人的剩余寿命的期望都是一样的, 和他现在的年龄无关. 这进一步说明指数分布作为寿命分布是有缺陷的. 此外, 因 $\mathring{e}_x=ET(x)=\frac{1}{\lambda}$, 故指数分布的参数 λ 正好是期望寿命的倒数.

命题 1.2

定义如下几个记号:

1. 用 ${}_tp_x\overset{\text{def}}{=}P(T(x)>t)=s_{T(x)}(t)$ 表示个体 (x) 在 t 年后还活着的概率. 显然有
$$ {}_tp_x=s_{T(x)}(t)=\mathrm{e}^{-\int_0^t\mu_x(s)\mathrm{d}s}=\mathrm{e}^{-\int_0^t\mu(x+s)\mathrm{d}s}=\mathrm{e}^{-\int_x^{x+t}\mu(s)\mathrm{d}s}.$$
2. 用 ${}_tq_x\overset{\text{def}}{=}P(T(x)\le t)=F_{T(x)}(t)$ 表示一个 x 岁的人在 t 年内死亡的概率. 易知
$${}_tp_x+{}_tq_x=1.$$
3. 用 ${}_{u|t}q_x\overset{\text{def}}{=}P(u<T(x)\le u+t)$ 表示一个 x 岁的人在 $x+u$ 岁还活着, 但在未来 t 年内死亡的概率.

推论 1.5

如下几个结论成立:

1. $\frac{d({}_tp_x)}{dt}=-{}_tp_x\mu_x(t)$;
2. $\frac{d({}_tp_x)}{dx}={}_tp_x(\mu(x)-\mu(x+t))$;
3. $f_{T(x)}(t)={}_tp_x\cdot\mu_x(t)$;
4. ${}_tp_x={}_sp_x\cdot{}_{t-s}p_{x+s},0\le s\le t$;
5. ${}_{u|t}q_x={}_up_x-{}_{u+t}p_x,u,t>0$;
6. ${}_{u|t}q_x={}_up_x\,{}_tq_{x+u},u,t\ge 0$.

定义 1.6 (个体 (x) 的整数与分数余命及期望)

类似处理新生儿的寿命一样, 可将个体 (x) 的余命 $T(x)$ 分为整数部分和小数部分. 设

$$T(x)=K(x)+S(x),$$

其中 $K(x)$ 是 $T(x)$ 的整数部分, $S(x)$ 是 $T(x)$ 的小数部分. 记

$$\mathring{e}_x \stackrel{\text{def}}{=} E(T(x)),\ e_x \stackrel{\text{def}}{=} E(K(x)).$$

则简单计算可知

$$\mathring{e}_x=E(T(x))=\int_0^{\infty}{}_tp_x dt,\ e_x=E(K(x))=\sum_{k=1}^{\infty}{}_kp_x.$$

♣

1.3 随机生存群

定义 1.7 (模型描述)

设 0 时刻系统中有 l_0 个新生儿, 他们的寿命独立同分布, 服从某分布, 生存函数为 $s(t), t\geq 0$. 记
$\mathscr{L}(x)$ 为在 x 岁还活着的总人数;
${}_t\mathscr{D}_x$ 为 $[x,x+t]$ 内死去的总人数.
设系统中初始时刻的 l_0 个人的寿命分别为 $X_1,X_2,...,X_n$, 则他们独立同分布, 且

$$P(X_i>t)=s(t), i=1,...,n.$$

显然有

$$\mathscr{L}(x)=\sum_{i=1}^{l_0}I_{\{X_i\geqslant x\}},\ {}_t\mathscr{D}_x=\sum_{i=1}^{l_0}I_{\{x\leqslant X_i<x+t\}},$$

其中 $I_A=\begin{cases}1, & \omega\in A,\\ 0, & \omega\in A^c\end{cases}$ 为示性函数.

令

$$l_x \stackrel{def}{=} E(\mathscr{L}(x)),\ \text{它表示在}x\text{岁还活着的期望人数};$$

$${}_td_x \stackrel{def}{=} E({}_t\mathscr{D}_x),\ \text{它表示在}[x,x+t)\text{内死去人数的期望}.$$

♣

推论 1.6

如下结论成立:

1. $l_x=l_0s(x),\ {}_td_x=l_x-l_{x+t}$;
2. ${}_tp_x=\frac{l_{x+t}}{l_x}$;
3. ${}_tq_x=\frac{{}_td_x}{l_x}$;
4. $l_{x+t}=l_xe^{-\int_x^{x+t}\mu(s)ds}$;
5. $\frac{dl_x}{dx}=-l_x\mu(x)$;
6. ${}_nd_x=\int_x^{x+n}l_y\mu(y)dy$.

♡

注 下面我们分析等式 ${}_td_x=\int_x^{x+t}l_yu(y)dy$ 的含义.

等式左端 ${}_td_x$ 表示在 $[x,x+t]$ 内死去的人数. 现分析右端. 注意到

$$\mu(y)dy=-\frac{s'(y)}{s(y)}dy=-\frac{ds(y)}{s(y)}=\frac{s(y)-s(y+\Delta y)}{s(y)}.$$

所以 $\mu(y)dy$ 表示一个人在 y 岁还活着的条件下, 在 $[y,y+dy]$ 内死去的概率, 于是 $l_y\mu(y)dy$ 表示在 $[y,y+dy]$ 内死去的人数. 对 y 积分可知, 等式右端的 $\int_x^{x+t}l_y\mu(y)dy$ 表示在 $[x,x+t]$ 内死去的人数. 所以右端等于左端.

1.4 生命表的元素

命题 1.3

在精算学的诸多记号中，若左下标是 1，通常将其省略，所以我们有

$$p_x \triangleq {}_1p_x,\ q_x \triangleq {}_1q_x,$$

$$L_x \triangleq {}_1L_x,\ {}_{u|}q_x \triangleq {}_{u|1}q_x.$$

命题 1.4

记 $a \wedge b = \min\{a, b\}$，$a \vee b = \max\{a, b\}$，$EX = \int_0^\infty xf(x)dx, X \geq 0$. 计算可得

$$E(X \wedge t) = \int_0^t xf(x)dx + tP(X > t).$$

定义 1.8 (条件数学期望)

设 A 是一个随机事件，X 为一个随机变量，给定事件 A 的条件下，X 的条件期望定义为

$$E(X|A) \overset{def}{=} \frac{E(XI_A)}{EI_A} = \frac{E(XI_A)}{P(A)}.$$

可以类似条件概率的定义理解条件期望的定义.

定义 1.9

${}_tL_x$：所有人在 $[x, x+t)$ 内活过的总时间，记作 ${}_tL_x = l_xE(T(x) \wedge t)$.

推论 1.7

如下结论成立：

$$\begin{aligned} {}_tL_x &= l_xE(T(x) \wedge t) \\ &= \int_0^t sl_{x+s}u(x+s)ds + tl_{x+t} \\ &= \int_0^t l_{x+s}ds \end{aligned}$$

注 表达式 $\int_0^t sl_{x+s}\mu(x+s)ds + tl_{x+t}$ 的含义如下：

一方面，在 $x+s$ 岁活着的人有 l_{x+s} 个，每个人在 $[x+s, x+s+ds]$ 内死去的概率为 $\mu(x+s)ds$，所以，在 $[x+s, x+s+ds]$ 内死去的人数为 $l_{x+s}\mu(x+s)ds$，他们每个人在 $[x, x+t]$ 内活 s 年，所以在 $x+s$ 岁死去的人在 $[x, x+t]$ 内活的总时间为 $sl_{x+s}\mu(x+s)ds$，再对 s 在 $(0, t)$ 求积分 (求和) 可知，$\int_0^t sl_{x+s}\mu(x+s)ds$ 表示在 $[x, x+t]$ 内死去的人在这段时间内活过的总时间.

另一方面，在 $x+t$ 岁还活着的人有 l_{x+t} 个，他们每个人在 $[x, x+t)$ 内活了 t 岁，故他们在 $[x, x+t)$ 内总共活了 tl_{x+t} 岁.

综合以上分析，$\int_0^t sl_{x+s}\mu(x+s)ds + tl_{x+t}$ 表示所有人在 $[x, x+t]$ 内活过的总时间，这是一个复杂的公式，但它有一个简单的表达 $\int_0^t l_{x+s}ds$.

定义 1.10

$a(x)$：一个 x 岁的人在 1 年内死去的条件下，在 $[x, x+1)$ 内活过的期望时间，记作 $a(x) = E(T(x)|T(x) \leq 1)$.

推论 1.8

以下等式成立:

1. $a(x) = \dfrac{\int_0^1 t_t p_x u_x(t) dt}{q_x}$;
2. $L_x = d_x a(x) + l_{x+1}$.

注 表达式 $L_x = d_x a(x) + l_{x+1}$ 的含义如下:

等式右端的 $d_x a(x)$ 表示 $[x, x+1)$ 内死去的人在 $[x, x+1)$ 内活过的总时间. 右端的 $l_{x+1} \times 1$ 表示在 $x+1$ 岁活着的 l_{x+1} 人在 $[x, x+1)$ 内活过的总时间. 所以, 右端表示所有人在 $[x, x+1)$ 活过的总时间, 正好等于左端的 L_x.

命题 1.5

1. 中心死亡率: ${}_n m_x = \dfrac{{}_n q_x}{\int_0^n {}_t p_x dt} = \dfrac{{}_n d_x}{{}_n L_x}$;
2. $T_x \triangleq \int_0^\infty l_{x+s} ds = {}_\infty L_x$, T_x 表示所有人在 $[x, \infty)$ 内活过的总时间;
3. $Y_x \triangleq \int_0^\infty T_{x+s} ds$.

1.5 分数年龄上的死亡假设

定义 1.11 (死亡力均匀分布假设 (UDD 假设))

若 x 为非负整数, $s(t)$ 是生存函数, 若 $\forall t \in [0, 1)$, 都有

$$s(x+t) = (1-t)s(x) + ts(x+1). \tag{1.4}$$

称在 $[x, x+1)$ 上, 死亡力均匀分布假设成立.

推论 1.9

设 $[x, x+1)$ 上 UDD 假设成立, 则有以下结论:

1. $l_{x+t} = (1-t)l_x + tl_{x+1}, t \in [0, 1)$;
2. ${}_t d_x = td_x, t \in [0, 1)$;
3. ${}_t q_x = tq_x, t \in [0, 1)$;
4. $f_{T(x)}(t) = q_x, t \in [0, 1)$;
5. $\mu_x(t) = \frac{q_x}{1-tq_x}$.

命题 1.6

在 UDD 假设之下, 我们有如下两个命题:

1. 已知在每一年龄段上 UDD 假设成立, 则 $K(x)$ 与 $S(x)$ 相互独立, 且 $S(x)$ 服从 $[0, 1]$ 上的均匀分布;
2. 在每一年龄段 UDD 假设成立时, 有

$$\mathring{e}_x = e_x + \frac{1}{2}, \ D(T(x)) = D(K(x)) + \frac{1}{12}.$$

定义 1.12 (常数死亡力假设)

设 x 为整数, 若 $\forall t \in [0, 1)$ 有

$$\ln s(x+t) = (1-t)\ln s(x) + t\ln s(x+1). \tag{1.5}$$

则称生存函数在年龄段 $[x, x+1)$ 满足常数死亡力假设.

推论 1.10

设在年龄段 $[x, x+1)$ 常数死亡力假设成立, 则对 $t \in (0,1)$, 有

1. 期望生存人数满足 $\ln l_{x+t} = (1-t)\ln l_x + t\ln l_{x+1}$;
2. 死亡力为常数, 即 $\mu_x(t) = -\ln p_x \triangleq \mu$;
3. $l_{x+t} = l_x e^{-\mu t}$, ${}_tq_x = 1 - p_x^t$, $f_{T(x)}(t) = -p_x^t \ln p_x$.

♡

例题 1.4 设 $S(x) = 1 - \frac{x}{12}$, $0 \le x \le 12$, l_0 个个体相互独立, 生存函数都是 $S(x)$.

(1) 求 $({}_3\mathscr{D}_0,\ {}_3\mathscr{D}_3,\ {}_3\mathscr{D}_6,\ {}_3\mathscr{D}_9)$ 的联合分布;

(2) 求这四个随机变量的期望和方差;

(3) 求它们两两之间的相关系数.

解 易知 l_0 个人的寿命 $X_1, X_2, ..., X_{l_0} \overset{\text{i.i.d.}}{\sim} U[0,12]$. 且随机变量满足

$$ {}_3\mathscr{D}_0 = \sum_{k=1}^{l_0} I_{\{0\le X_k\le 3\}},\ {}_3\mathscr{D}_3 = \sum_{k=1}^{l_0} I_{\{3\le X_k\le 6\}},\ {}_3\mathscr{D}_6 = \sum_{k=1}^{l_0} I_{\{6\le X_k\le 9\}},\ {}_3\mathscr{D}_9 = \sum_{k=1}^{l_0} I_{\{9\le X_k\le 12\}}. $$

(1) 令事件 $A = \{{}_3\mathscr{D}_0 = k_1,\ {}_3\mathscr{D}_3 = k_2,\ {}_3\mathscr{D}_6 = k_3,\ {}_3\mathscr{D}_9 = k_4\}$, 若事件 A 发生, 则在 l_0 个人中, 有 k_1 人在 $[0,3]$ 内死亡; 有 k_2 人在 $[3,6]$ 内死亡; 有 k_3 人在 $[6,9]$ 内死亡; 有 k_4 人在 $[9,12]$ 内死亡, 其中 $k_1+k_2+k_3+k_4 = l_0$. 从 $k_1+k_2+k_3+k_4$ 个人中, 选出 k_1 个人在 $[0,3]$ 内死亡, 有 $C_{k_1+k_2+k_3+k_4}^{k_1}$ 种选法; 从 $k_2+k_3+k_4$ 个人中, 选出 k_2 个人在 $[3,6]$ 内死亡, 有 $C_{k_2+k_3+k_4}^{k_2}$ 种选法; 从 k_3+k_4 个人中, 选出 k_3 个人在 $[6,9]$ 内死亡, 有 $C_{k_3+k_4}^{k_3}$ 种选法. 于是

$$ P(A) = \frac{(k_1+k_2+k_3+k_4)!}{k_1!k_2!k_3!k_4!} \cdot {}_3q_0^{k_1} \cdot {}_{3|3}q_0^{k_2} \cdot {}_{6|3}q_0^{k_3} \cdot {}_{9|3}q_0^{k_4}. $$

(2) 对于一个二项分布 $B(n,p)$, 其期望 $E(X) = np$, 方差 $\mathrm{Var}(X) = np(1-p)$.

因此, 对于每个随机变量 ${}_3\mathscr{D}_k$ 有

期望

$$ E({}_3\mathscr{D}_k) = \frac{l_0}{4}; $$

方差

$$ \mathrm{Var}({}_3\mathscr{D}_k) = l_0 \cdot \frac{1}{4} \cdot \left(1 - \frac{1}{4}\right) = \frac{3l_0}{16}. $$

(3) 以 ${}_3\mathscr{D}_0,\ {}_3\mathscr{D}_3$ 的相关系数为例:

$$ \begin{aligned} \mathrm{Cov}({}_3\mathscr{D}_0,\ {}_3\mathscr{D}_3) &= E({}_3\mathscr{D}_0\ {}_3\mathscr{D}_3) - E({}_3\mathscr{D}_0)E({}_3\mathscr{D}_3) \\ &= E(\sum_{k=1}^{l_0} I_{\{0\le X_k\le 3\}} \cdot \sum_{j=1}^{l_0} I_{\{3\le X_j\le 6\}}) - (\frac{l_0}{4})^2 \\ &= \sum_{k=1}^{l_0}\sum_{j\ne k} E(I_{\{0\le X_k\le 3\}} \cdot I_{\{3\le X_j\le 6\}}) - (\frac{l_0}{4})^2 \\ &= \frac{l_0(l_0-1)}{16} - \frac{l_0^2}{16} = -\frac{l_0}{16}. \end{aligned} $$

(对于 $\sum_{k=1}^{l_0}\sum_{j\ne k} E(I_{\{0\le x_X\le 3\}} \cdot I_{\{3\le X_j\le 6\}}) = \frac{l_0(l_0-1)}{16}$ 的理解: 其中 $\sum_{k=1}^{l_0}\sum_{j\ne k} 1 = l_0(l_0-1)$, 而 $p(I_{c\le X_i\le c+3}) = \frac{1}{4}$, 故 $I_{0\le X_k\le 3}$ 与 $I_{3\le X_j\le 6}$ 同时取 1 的概率为 $\frac{1}{16}$.)

求出协方差后即可求相关系数:

$$ \begin{aligned} \rho({}_3\mathscr{D}_0,\ {}_3\mathscr{D}_3) &= \frac{\mathrm{Cov}({}_3\mathscr{D}_0,\ {}_3\mathscr{D}_3)}{\sqrt{D({}_3\mathscr{D}_0)} \cdot \sqrt{D({}_3\mathscr{D}_3)}} \\ &= \frac{-\frac{l_0}{16}}{\sqrt{\frac{3}{16}l_0 \cdot \frac{3}{16}l_0}} \\ &= -\frac{1}{3}. \end{aligned} $$

类似计算可知, 两两之间所有相关系数皆为 $-\frac{1}{3}$.

第 2 章 人寿保险

2.1 人寿保险概述

$$
\text{人寿保险}\begin{cases}
\text{生存保险}\\
\text{生死合险}\\
\text{死亡保险}\begin{cases}
\text{定期死亡保险}\\
\text{终身死亡保险}\\
\text{延期死亡保险}\begin{cases}
\text{延期定期死亡保险}\\
\text{延期终身死亡保险}
\end{cases}
\end{cases}
\end{cases}
$$

2.2 生存保险

定义 2.1 (支付现值)

若被保险人在 n 年内死亡 (即 $T(x)<n$), 则不予任何支付;

若他在 n 年内未死 (即 $T(x)\geqslant n$), 则在 n 时刻支付他 1 元保险金.

若 $T(x)<n$, 则 $Z=0$; 若 $T(x)\geqslant n$, 则 $Z=1\cdot\nu^n=\nu^n$, 其中贴现因子 $\nu=\frac{1}{i+1}$.

即 $Z=\nu^n I_{\{T(x)\geqslant n,\}}$.

♣

命题 2.1 (精算现值与方差)

1. $E(Z)=\nu^n\cdot {}_np_x=A_{x:\overline{n}|}^{\ \,1}={}_nE_x$;
2. $EZ^2=E\left(\left[\nu^n I_{\{T(x)\geqslant n\}}\right]^2\right)=E\left(\nu^{2n}I_{\{T(x)\geqslant n\}}\right)=\nu^{2n}\cdot {}_np_x$;
3. $DZ=EZ^2-(EZ)^2=\nu^{2n}\cdot {}_np_x\cdot {}_nq_x$.

♠

推论 2.1 (精算现值的性质)

$\forall 0\leqslant k\leqslant n$, 有

1. ${}_nE_x={}_kE_x\cdot {}_{n-k}E_{x+k}$;
2. $(1+i)^k\cdot l_x\cdot {}_nE_x=l_{x+k}\cdot {}_{n-k}E_{x+k}$.

♡

注 等式 $(1+i)^k\cdot l_x\cdot {}_nE_x=l_{x+k}\cdot {}_{n-k}E_{x+k}$ 的含义如下:

在 0 时刻, l_x 个人各自买了一份 n 年期的生存保险, 保费总额为 $l_x\cdot {}_nE_x$, k 年后, 这笔钱的积累值为 $(1+i)^k\cdot l_x\cdot {}_nE_x$, 若此时保险公司破产不干了, 他分给在 k 时刻还活着的 l_{x+k} 个人每人 ${}_{n-k}E_{x+k}$ 元, 这正好够每个人去重新买一份 $n-k$ 年期的生存保险.

2.3 n 年期 (定期) 死亡保险

2.3.1 死亡立即支付的 n 年期定期寿险

定义 2.2 (支付现值)

若 (x) 在 n 年内死亡 (即 $T(x) < n$), 则在 $T(x)$ 时刻支付 1 元保险金;
若 (x) 在 n 年内未死 (即 $T(x) \geqslant n$), 则不予支付.
若 $T(x) < n$, 则 $Z = \nu^{T(x)}$; 若 $T(x) \geqslant n$, 则 $Z = 0$.
所以 $Z = \nu^{T(x)} I_{\{T(x)<n\}}$.

命题 2.2 (精算现值与方差)

1. $E(Z) = \int_0^n \nu^t \cdot {}_tp_x \cdot \mu_x(t)dt = \int_0^n e^{-\delta t} \cdot {}_tp_x \cdot \mu_x(t)dt = \overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}}$;
2. $DZ = {}^2\overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}} - (\overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}})^2 = \overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}}@2\delta - (\overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}}@\delta)^2$.

注 记 ${}^j\overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}} = \int_0^\infty e^{-j\delta t} \cdot {}_tp_x \cdot \mu_x(t)dt$, ${}^j\overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}}@\delta = \overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}}@j\delta$.

推论 2.2 (精算现值的性质)

$\forall 0 \leqslant k \leqslant n$, 有

1. $\overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}} = \overline{A}^{\,1}_{x:\overline{k|}} + {}_kE_x \cdot \overline{A}^{\,1}_{x+k:\overline{n-k|}}$;
2. $l_x \cdot \overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}} = \int_0^n \nu^t \cdot l_{x+t} \cdot \mu_x(t)dt$.

注 等式 $l_x \cdot \overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}} = \int_0^n \nu^t \cdot l_{x+t} \cdot \mu_x(t)dt$ 的含义如下::

$\mu_x(t)dt$ 表示在 $[x+t, x+t+dt]$ 内死去的概率, 所以 $l_{x+t}\mu_x(t)dt$ 表示在 $[x+t, x+t+dt]$ 内死去的人数, 在这期间内死去的人每人支付 1 元保险金, 共 $l_{x+t}\mu_x(t)dt$ 元, 这些钱的现值为 $\nu^t l_{x+t}\mu_x(t)dt$, 于是 $\int_0^n \nu^t l_{x+t}\mu_x(t)dt$ 表示在 $[x, x+n]$ 内死去的人领取的保险的总现值, 这些钱应等于初始时刻的 l_x 个人的保费总额 $l_x\overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}}$.

例题 2.1 假设死亡力 $\mu(t) \equiv \mu$, 利息力为 δ, 个体 (x) 投了一个 n 年期寿险, 计算精算现值及支付现值的方差.

解 由于死亡力是一个常数, 所以

$$\begin{aligned}\overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}} &= \int_0^n e^{-\delta t} {}_tp_x\mu_x(t)dt = \int_0^n e^{-\delta t} \cdot e^{-\int_x^{x+t}\mu ds}\mu dt \\ &= \int_0^n e^{-\delta t} \cdot e^{-\mu t}\mu dt = \frac{\mu}{\mu+\delta}\left(1 - e^{-(\mu+\delta)n}\right).\end{aligned}$$

进而有

$${}^2\overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}} = \frac{\mu}{\mu+2\delta}\left(1 - e^{-(\mu+2\delta)n}\right).$$

于是

$$\begin{aligned}DZ &= {}^2\overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}} - (\overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n|}})^2 \\ &= \frac{\mu}{\mu+2\delta}\left(1 - e^{-(\mu+2\delta)n}\right) - \left(\frac{\mu}{\mu+\delta}\left(1 - e^{-(\mu+\delta)n}\right)\right)^2.\end{aligned}$$

2.3.2 死亡年末支付的 n 年期定期寿险

定义 2.3 (支付现值)

若个体 (x) 在 n 年内死亡, 则在其死亡年末支付 1 元;
若个体 (x) 在 n 年内未死, 则不予支付.
$Z = \nu^{K(x)+1} I_{\{T(x)<n\}}$.

命题 2.3 (精算现值与方差)

1. $E(Z)=\sum_{k=0}^{n-1}\nu^{k+1}{}_{k|}q_x=A^1_{x:\overline{n}|}$;
2. $DZ={}^2A^1_{x:\overline{n}|}-(A^1_{x:\overline{n}|})^2$, 其中 ${}^2A^1_{x:\overline{n}|}=\sum_{k=0}^{n-1}\nu^{2(k+1)}{}_{k|}q_x$.

推论 2.3 (精算现值的性质)

$\forall\, 0\le m\le n$, 有 $A^1_{x:\overline{n}|}=A^1_{x:\overline{m}|}+{}_mE_x\cdot A^1_{x+m:\overline{n-m}|}$.

注意到当 $m=1$ 时, $A^1_{x:\overline{1}|}=\nu q_x$, ${}_1E_x=\nu p_x$, 立即可得

1. $A^1_{x:\overline{n}|}=\nu q_x+\nu p_x\cdot A^1_{x:\overline{n-1}|}$;
2. $(1+i)l_xA^1_{x:\overline{n}|}=d_x+l_{x+1}A^1_{x+1:\overline{n-1}|}$.

注 等式 $(1+i)l_xA^1_{x:\overline{n}|}=d_x+l_{x+1}A^1_{x+1:\overline{n-1}|}$ 的含义如下:

此式的左端表示在 0 时刻, l_x 个人各自买了一份 n 年期的死亡保险, 保费总额为 $l_xA^1_{x:\overline{n}|}$. 一年后, 这笔钱的积累值为 $(1+i)l_xA^1_{x:\overline{n}|}$. 右端表示, 在 $[0,1]$ 之间有 d_x 个人死去, 保险公司需给他们每人 1 元, 共 d_x 元. 若此时保险公司破产不干了, 他分给在 1 时刻还活着的 l_{x+1} 个人每人 $A^1_{x+1:\overline{n-1}|}$ 元, 这正好够每个人去重新买一份 $n-1$ 年期的死亡保险. 所以保险公司一年后的支出总额为 $d_x+l_{x+1}A^1_{x+1:\overline{n-1}|}$, 正好等于保险公司收到总保费在一年后的累计值. 所以左端等于右端.

例题 2.2 设一个 20 岁的人买了一份 10 年期的死亡保险, 设其余命 $T(20)$ 服从 $[0,80]$ 上的均匀分布, $i=0.05$, 保险金死亡年末支付 10 万元.

解 支付现值

$$Z=\nu^{K(20)+1}I_{T(20)<10}\cdot 100000,$$

精算现值

$$\begin{aligned}E(Z)&=100000\cdot A^1_{20:\overline{10}|}\\&=100000\cdot\sum_{k=0}^{9}\nu^{k+1}\cdot{}_{k|}q_{20}\\&\approx 9652.1687.\end{aligned}$$

命题 2.4 (死亡年末支付与死亡立即支付的关系)

设死亡力均匀分布假设成立, 则 $\overline{A}^1_{x:\overline{n}|}=\frac{i}{\delta}A^1_{x:\overline{n}|}$.

2.4 终身死亡保险

2.4.1 死亡后立即支付的终身死亡保险

定义 2.4 (支付现值)

在个体 (x) 死亡时刻立刻支付 1 元保险金, $Z=\nu^{T(x)}$.

命题 2.5 (精算现值与方差)

1. $E(Z)=\int_0^\infty\nu^t{}_tp_x\mu_x(t)\mathrm{d}t=\overline{A}_x$;
2. $DZ={}^2\overline{A}_x-(\overline{A}_x)^2$, 其中 ${}^2\overline{A}_x=\int_0^\infty\nu^{2t}{}_tp_x\mu_x(t)\mathrm{d}t$.

推论 2.4 (精算现值的性质)

1. 对 $n \geq 1$, 有 $\overline{A}_x = \overline{A}^{\,1}_{x:\overline{n}|} + {}_nE_x \cdot \overline{A}_{x+n}$;
2. $\frac{d\overline{A}_x}{dx} = \delta \overline{A}_x + \mu(x)(\overline{A}_x - 1)$.

例题 2.3 设死亡力为 μ, 利息力为 δ, 个体 (x) 投了一份死亡立即支付的终身寿险, 求 $\overline{A}_x, {}^2\overline{A}_x$ 和给付现值 Z 的方差 $D(Z)$.

解

$$
\begin{aligned}
\overline{A}_x &= \int_0^{\infty} e^{-\delta t} \cdot {}_tp_x \cdot \mu_x(t) dt \\
&= \int_0^{\infty} e^{-\delta t} \cdot e^{-\int_x^{x+t} \mu(s) ds} \cdot \mu_x(t) dt \\
&= \int_0^{\infty} e^{-\delta t} \cdot e^{-\int_x^{x+t} u ds} \cdot \mu dt \\
&= \int_0^{\infty} e^{-\delta t} \cdot e^{-ut} \cdot \mu dt \\
&= \frac{\mu}{\delta + \mu}, \\
{}^2\overline{A}_x &= \frac{\mu}{2\delta + \mu}, \\
DZ &= {}^2\overline{A}_x - (\overline{A}_x)^2 = \frac{\mu}{2\delta + \mu} - (\frac{\mu}{\delta + \mu})^2.
\end{aligned}
$$

2.4.2 死亡年末支付的终身寿险

定义 2.5 (支付现值)

在个体 (x) 死亡的年末, 保险人支付 1 元保险金, $Z = \nu^{K(x)+1}$.

命题 2.6 (精算现值与方差)

1. $E(Z) = \sum_{k=0}^{\infty} \nu^{k+1} {}_{k|}q_x = A_x$;
2. $DZ = {}^2\overline{A}_x - (\overline{A}_x)^2$, 其中 ${}^2\overline{A}_x = \int_0^{\infty} \nu^{2t} {}_tp_x \mu_x(t) \mathrm{d}t$.

推论 2.5 (精算现值的性质)

1. $A_x = A^{1}_{x:\overline{n}|} + {}_nE_x \cdot A_{x+n}$;
2. $A_x = \nu q_x + \nu p_x \cdot A_{x+1}$;
3. $(1+i)A_x = q_x + p_x \cdot A_{x+1}$;
4. $(1+i)l_x A_x = d_x + l_{x+1} \cdot A_{x+1}$;
5. $l_x A_x = \sum_{k=0}^{\infty} \nu^{k+1} \cdot d_{x+k}$.

命题 2.7

在 UDD 假设之下, 有 $\overline{A}_x = \frac{i}{\delta} A_x$.

2.5 生死合险 (两全保险)

2.6 延期终身死亡保险

2.7 将每年分为 m 个区间, 在死亡区间末支付 1 元的终身死亡保险

2.8 变额人寿保险

2.9 小结

2.9.1 寿险支付现值

	期末寿险	连续寿险
终身	$\nu^{K(x)+1}$	$\nu^{T(x)}$
n 年期	$\nu^{K(x)+1}I_{\{K(x)<n\}}$	$\nu^{T(x)}I_{\{T(x)<n\}}$

2.9.2 寿险精算现值

	期末寿险	连续寿险
终身	$A_x = \sum_{k=0}^{\infty} \nu^{k+1}{}_{k\|}q_x$	$\overline{A}_x = \int_0^{\infty} \nu^t \cdot {}_tp_x \cdot \mu_x(t)dt$
n 年期	$A^1_{x:\overline{n}\|} = \sum_{k=0}^{n-1} \nu^{k+1}{}_{k\|}q_x$	$\overline{A}^1_{x:\overline{n}\|} = \int_0^{n} \nu^t \cdot {}_tp_x \cdot \mu_x(t)dt$

第 3 章 生存年金

在本章最后一章节给出了各种生存年金的定义公式及精算现值, 故在前面几个章节仅给出一些命题与性质.

3.1 期初生存年金

3.1.1 终身期初生存年金

推论 3.1

因为 $Z = \ddot{a}_{\overline{K(x)+1}|} = \frac{1-\nu^{K(x)+1}}{d}$, 所以 $\ddot{a}_x = EZ = E(\ddot{a}_{\overline{K(x)+1}|}) = E(\frac{1-\nu^{K(x)+1}}{d})$. 故 $\ddot{a}_x = \frac{1-E(\nu^{K(x)+1})}{d} = \frac{1-A_x}{d}$. 于是如下等式成立,

$$A_x + d\ddot{a}_x = 1.$$

3.1.2 n 年期初生存年金

推论 3.2 ($A_{x:\overline{n}|}$ 与 $\ddot{a}_{x:\overline{n}|}$ 的关系)

$d\ddot{a}_{x:\overline{n}|} + A_{x:\overline{n}|} = 1.$

命题 3.1

1. $\ddot{a}_x = \ddot{a}_{x:\overline{n}|} + {}_nE_x\ddot{a}_{x+n}$;
2. $l_x\ddot{a}_x = l_x\ddot{a}_{x:\overline{n}|} + \nu^n l_{x+n}\ddot{a}_{x+n}$.

注 等式 $l_x\ddot{a}_x = l_x\ddot{a}_{x:\overline{n}|} + \nu^n l_{x+n}\ddot{a}_{x+n}$ 的含义如下:

左端表示初始时刻有 l_x 个 (x) 岁的个体, 各买一份终身期初生存年金, 保险公司共收到保费 $l_x\ddot{a}_x$ 元. 右端表示在收到保费后, 保险公司将其中的 $l_x\ddot{a}_{x:\overline{n}|}$ 为 l_x 个人各买一份 n 年期期初生存年金, 保证 n 年内死去的人可以领到年金, 剩余的部分拿去投资, 在第 n 年末, 还有 l_{x+n} 个人活着, 保险公司给他们每人买一份终身期初生存年金, 共需 $l_{x+n}\ddot{a}_{x+n}$ 元. 保险公司支出的总现值为 $l_x\ddot{a}_{x:\overline{n}|} + \nu^n l_{x+n}\ddot{a}_{x+n}$. 保险公司收入的现值应等于支出的总现值, 所以左端等于右端.

现行的养老保险其实就是保费分期缴纳的延期终身期初生存年金.

3.2 期末生存年金

3.3 每年分成 m 个区间的生存年金

3.4 连续生存年金

定义 3.1 (连续年金)

设年金函数 (年金的支付速率) 为 $f(t)$, 则在 $[t, t+dt]$ 内支付的额度为 $f(t)dt$, 其现值为 $\nu^t f(t)dt$, 所以在 $[0, n]$ 内支付的总现值为 $\int_0^n \nu^t f(t)dt$. 特别地, 若 $f(t) \equiv 1$, 则得到 $\bar{a}_{\overline{n}|} = \frac{1-\nu^n}{\delta}$. 以下总假定年金支付速率为 1.

3.4.1 连续的终身生存年金

推论 3.3 ($\bar{a}_x$ 与 $\bar{A}_x$ 的关系)

$\delta\bar{a}_x+\bar{A}_x=1.$

命题 3.2

$\frac{d}{dx}\bar{a}_x=(\mu(x)+\delta)\bar{a}_x-1.$

例题 3.1 设死亡力为 μ, 利息力为 δ, 求 $\bar{a}_x, \bar{A}_x, D(\bar{a}_{\overline{T(x)}|})$.

解 $\bar{a}_x=\int_0^\infty \nu^t {}_tp_x dt=\int_0^\infty e^{-\delta t}e^{-\int_x^{x+t}\mu(s)ds}dt=\int_0^\infty e^{-\mu t}e^{-\delta t}dt=\frac{1}{\mu+\delta}$.

$\bar{A}_x=\int_0^\infty \nu^t {}_tp_x\mu_x(t)dt=\int_0^\infty e^{-\delta t}e^{-\int_x^{x+t}\mu(s)ds}\mu dt=\int_0^\infty e^{-\mu t}e^{-\delta t}\mu dt=\frac{\mu}{\mu+\delta}$.

${}^2\bar{A}_x=\frac{\mu}{\mu+2\delta}$, 故 $D(\bar{a}_{\overline{T(x)}|})=\frac{{}^2\bar{A}_x-(\bar{A}_x)^2}{\delta^2}=\frac{1}{\delta^2}[\frac{\mu}{\mu+2\delta}-(\frac{\mu}{\mu+\delta})^2]$.

3.4.2 n 年期连续生存年金

推论 3.4 ($\bar{a}_{x:\overline{n}|}$ 与 $\bar{A}_{x:\overline{n}|}$ 的关系)

$\delta\bar{a}_{x:\overline{n}|}+\bar{A}_{x:\overline{n}|}=1.$

命题 3.3

1. $\bar{a}_x=\bar{a}_{x:\overline{n}|}+{}_nE_x\bar{a}_{x+n}$;
2. $l_x\bar{a}_x=l_x\bar{a}_{x:\overline{n}|}+\nu^n l_{x+n}\bar{a}_{x+n}$;
3. $\bar{a}_{x:\overline{n}|}=\bar{a}_{x:\overline{m}|}+{}_mE_x\bar{a}_{x+m:\overline{n-m}|}$;
4. $l_x\bar{a}_{x:\overline{n}|}=l_x\bar{a}_{x:\overline{m}|}+\nu^m l_{x+n}\bar{a}_{x+m:\overline{n-m}|}$.

3.4.3 延期 n 年的终身连续生存年金

3.5 小结

3.5.1 生存年金支付现值

	期初生存年金	期末生存年金	连续生存年金
终身	$\ddot{a}_{\overline{K(x)+1}|}=\sum_{j=0}^{K(x)}\nu^j$	$a_{\overline{K(x)}|}=\sum_{j=1}^{K(x)}\nu^j$	$\bar{a}_{\overline{T(x)}|}=\int_0^{T(x)}\nu^t dt$
n 年期	$\ddot{a}_{\overline{(K(x)+1)\wedge n}|}=\sum_{j=0}^{K(x)\wedge(n-1)}\nu^j$	$a_{\overline{K(x)\wedge n}|}=\sum_{j=1}^{K(x)\wedge n}\nu^j$	$\bar{a}_{\overline{T(x)\wedge n}|}=\int_0^{T(x)\wedge n}\nu^t dt$
延期 n 年	$\ddot{a}_{\overline{(K(x)+1)}|}-\ddot{a}_{\overline{(K(x)+1)\wedge n}|}$	$a_{\overline{K(x)}|}-a_{\overline{K(x)\wedge n}|}$	$\bar{a}_{\overline{T(x)}|}-\bar{a}_{\overline{T(x)\wedge n}|}$
n 年期确定性	$\ddot{a}_{\overline{(K(x)+1)\vee n}|}$	$a_{\overline{K(x)\vee n}|}$	$\bar{a}_{\overline{T(x)\vee n}|}$

3.5.2 生存年金精算现值

	期初生存年金	期末生存年金	连续生存年金
终身	$\ddot{a}_x = \sum_{j=0}^{\infty} \nu^j {}_jp_x$	$a_x = \ddot{a}_x - 1 = \sum_{j=1}^{\infty} \nu^j {}_jp_x$	$\bar{a}_x = \int_0^{\infty} \nu^t {}_tp_x dt$
n 年期	$\ddot{a}_{x:\overline{n}\rceil} = \sum_{j=0}^{n-1} \nu^j {}_jp_x$	$a_{x:\overline{n}\rceil} = \sum_{j=1}^{n} \nu^j {}_jp_x$ $= \ddot{a}_{x:\overline{n}\rceil} - 1 + \nu^n {}_np_x$	$\bar{a}_{x:\overline{n}\rceil} = \int_0^{n} \nu^t {}_tp_x dt$
延期 n 年	${}_{n\|}\ddot{a}_x = \ddot{a}_x - \ddot{a}_{x:\overline{n}\rceil}$ $= {}_nE_x \ddot{a}_{x+n}$ $= \sum_{j=n}^{\infty} \nu^j {}_jp_x$	${}_{n\|}a_x = a_x - a_{x:\overline{n}\rceil}$ $= {}_nE_x a_{x+n}$ $= \sum_{j=n+1}^{\infty} \nu^j {}_jp_x$	${}_{n\|}\bar{a}_x = \int_n^{\infty} \nu^t {}_tp_x dt$ $= \bar{a}_x - \bar{a}_{x:\overline{n}\rceil}$ $= {}_nE_x \bar{a}_{x+n}$
n 年期确定型	$\ddot{a}_{\overline{x:\overline{n}\rceil}} = {}_{n\|}\ddot{a}_x + \ddot{a}_{\overline{n}\rceil}$	$a_{\overline{x:\overline{n}\rceil}} = a_{\overline{n}\rceil} + {}_{n\|}a_x$	$\bar{a}_{\overline{x:\overline{n}\rceil}} = {}_{n\|}\bar{a}_x + \bar{a}_{\overline{n}\rceil}$

第 4 章 净保费理论

4.1 平衡准则

定义 4.1 (平衡准则)

投保人缴纳保费的精算现值等于保险人支付保险金的精算现值.

定义 4.2 (保险人签单损失量)

L =“保险人支付保险金的现值”减去“投保人缴纳保费的现值”.

由平衡准则, 有 $E(L)=0$.

定义 4.3 (年均衡净保费)

1. 若保费按年分期缴纳, 每年缴纳的数额一样, 则称每年缴纳的保费额为年均净保费;
2. 若保费按固定的速率连续缴纳, 则称保费缴纳的速率为年均净保费.

例题 4.1 设个体 (x) 买了一份死亡年末支付 1 元的终身死亡保险, 设 ${}_{k|}q_x=0.2, k=0,1,2,3,4$, 利率 $i=0.06$, 保费每年年初等额分期缴纳. 分别在 (1) 平衡准则, (2) 指数准则 $(a=0.1)$, (3) 分位数准则 $(\alpha=0.2)$ 之下来计算年均衡净保费 P.

解 保险人支付的保险金的现值为 $\nu^{K(x)+1}$;

投保人缴纳的保费总现值为 $P\ddot{a}_{\overline{K(x)+1|}}$.

所以签单损失量为:

$$\begin{aligned} L &= \nu^{K(x)+1} - P\ddot{a}_{\overline{K(x)+1|}} = \nu^{K(x)+1} - P\cdot\frac{1-\nu^{K(x)+1}}{d} \\ &= (1+\frac{P}{d})\nu^{K(x)+1} - \frac{P}{d}. \end{aligned}$$

(1) 平衡准则之下,

$$E(L) = E(\nu^{K(x)+1}) - PE(\ddot{a}_{\overline{K(x)+1|}}) = A_x - P\ddot{a}_x = 0,$$

所以 $P=\frac{A_x}{\ddot{a}_x}=\frac{dA_x}{1-A_x}$. 注意到

$$A_x = \sum_{k=0}^{\infty}\nu^{k+1}{}_{k|}q_x = \sum_{k=0}^{4}\nu^{k+1}0.2 = 0.2\sum_{k=1}^{5}\nu^k = 0.2a_{\overline{5|}} = 0.84247276.$$

所以

$$P = \frac{A_x}{\ddot{a}_x} = \frac{dA_x}{1-A_x} = 0.3027.$$

(2) 指数准则及 (3) 分数准则之下的计算留作作业.

4.2 趸交净保费

定义 4.4 (趸交净保费)

若保费是在签定保险单时一次缴清, 则将其中净保费的部分称为趸交净保费, 通常用 P 表示.

4.3 完全连续险种的年均衡净保费

定义 4.5

称保费连续缴纳、保险金死亡立即支付的险种为完全连续险种.

4.3.1 完全连续的终身死亡保险

命题 4.1

- 签单损失量为 $L = \nu^{T(x)} - \overline{P}\left(\overline{A}_x\right)\overline{a}_{\overline{T(x)}|} = (1 + \frac{\overline{P}(\overline{A}_x)}{\delta})\nu^{T(x)} - \frac{\overline{P}(\overline{A}_x)}{\delta}$;
- 年均衡净保费为 $\overline{P}\left(\overline{A}_x\right) = \frac{\overline{A}_x}{\overline{a}_x} = \frac{\delta\overline{A}_x}{1-\overline{A}_x} = \frac{1}{\overline{a}_x} - \delta$;
- 签单损失量 L 的方差为

$$DL = \frac{{}^2\overline{A}_x - (\overline{A}_x)^2}{(\delta\overline{a}_x)^2} = \frac{{}^2\overline{A}_x - (\overline{A}_x)^2}{(1-\overline{A}_x)^2}.$$

例题 4.2 设死亡力 $\mu = 0.05$, 利息力 $\delta = 0.05$.

解 我们有

$$\overline{A}_x = \frac{\mu}{\mu+\delta} = \frac{1}{2},\ {}^2\overline{A}_x = \frac{\mu}{\mu+2\delta} = \frac{1}{3}.$$

从而

$$\overline{P}\left(\overline{A}_x\right) = \frac{\delta\overline{A}_x}{1-\overline{A}_x} = 0.05,$$

$$DL = \frac{{}^2\overline{A}_x - (\overline{A}_x)^2}{(1-\overline{A}_x)^2} = \frac{\frac{1}{3} - (\frac{1}{2})^2}{(1-\frac{1}{2})^2} = \frac{1}{3}.$$

4.3.2 缴费期为 h 年的完全连续的 n 年期定期寿险 $(h \le n)$

命题 4.2

- 签单损失量: 最后的缴费时刻为 $T(x) \wedge h$, 故 $L = \nu^{T(x)} I_{\{T(x)<n\}} - {}_h\overline{P}(\overline{A}^1_{x:\overline{n}|})\overline{a}_{\overline{T(x)\wedge h}|}$;
- 年均衡净保费为 ${}_h\overline{P}(\overline{A}^1_{x:\overline{n}|}) = \frac{\overline{A}^1_{x:\overline{n}|}}{\overline{a}_{x:\overline{h}|}}$.

注 一般地,

$$\text{某险种的年均衡净保费} = \frac{\text{该险种的精算现值}}{\text{缴费期对应的生存年金}}.$$

4.3.3 其他完全连续险种的年均净保费

命题 4.3

1. 缴费期为 h 年的终身寿险: ${}_h\overline{P}(\overline{A}_x) = \frac{\overline{A}_x}{\overline{a}_{x:\overline{h}|}}$;
2. 缴费期为 h 年的延 n 年期终身生存年金: ${}_h\overline{P}({}_{n|}\overline{a}_x) = \frac{{}_{n|}\overline{a}_x}{\overline{a}_{x:\overline{h}|}}$;
3. 延期 n 年的终身生存年金: $\overline{P}({}_{n|}\overline{a}_x) = \frac{{}_{n|}\overline{a}_x}{\overline{a}_{x:\overline{n}|}}$;
4. 延期 n 年的终身死亡保险: $\overline{P}({}_{n|}\overline{A}_x) = \frac{{}_{n|}\overline{A}_x}{\overline{a}_{x:\overline{n}|}}$.

4.4 完全离散险种的年均衡净保费

定义 4.6

保费按年等额分期缴纳, 保险金死亡年末支付的险种称为完全离散险种.

4.4.1 完全离散终身寿险

命题 4.4

- 签单损失量 $L=\nu^{K(x)+1}-P_x\ddot{a}_{\overline{K(x)+1}|}=(1+\frac{P_x}{d})\nu^{K(x)+1}-\frac{P_x}{d}$;
- 年均衡净保费记为 $P_x=\frac{A_x}{\ddot{a}_x}=\frac{dA_x}{1-A_x}=\frac{1}{\ddot{a}_x}-d$;
- 签单损失量的方差

$$D(L)=\frac{{}^2A_x-(A_x)^2}{(d\ddot{a}_x)^2}=\frac{{}^2A_x-(A_x)^2}{(1-A_x)^2}.$$

例题 4.3 某人现年 50 岁, 买了一份完全离散的终身寿险, 假设 $T(50)\sim U[0,50)$, $i=0.05$. 求年均衡净保费 P_x, 并计算签单损失量 L 的方差.

解

$$P_{50}=\frac{A_{50}}{\ddot{a}_{50}}$$

$$A_{50}=\sum_{k=0}^{\infty}\nu^{k+1}{}_{k|}q_{50}=\sum_{k=0}^{49}\nu^{k+1}\frac{1}{50}=\frac{1}{50}\sum_{k=1}^{50}\nu^k\approx 0.3651185$$

$$\ddot{a}_{50}=\sum_{k=0}^{\infty}\nu^k{}_kP_{50}=\sum_{k=0}^{49}\nu^k\frac{50-k}{50}.$$

利用错位相减法, 可以计算出 $\ddot{a}_{50}$, 请读者自己完成. 此题可以避开 $\ddot{a}_{50}$ 的计算.

$$P_{50}=\frac{dA_{50}}{1-A_{50}}=0.02738558,$$

$$D(L)=\frac{{}^2A_{50}-(A_{50})^2}{(1-A_{50})^2}=0.1496662.$$

4.4.2 其他完全离散险种的年均衡净保费

命题 4.5

1. 缴费期为 n 年的终身死亡保险: ${}_nP(A_x)=\frac{A_x}{\ddot{a}_{x:\overline{n}|}}$;
2. n 年期生存保险: $P_{x:\overset{\,1}{\overline{n}|}}=\frac{A_{x:\overset{\,1}{\overline{n}|}}}{\ddot{a}_{x:\overline{n}|}}$;
3. 延期 n 年的终身期初生存年金: $P({}_{n|}\ddot{a}_x)=\frac{{}_{n|}\ddot{a}_x}{\ddot{a}_{x:\overline{n}|}}$;
4. 缴费期为 h 年的 n 年期死亡保险: ${}_hP^1_{x:\overline{n}|}=\frac{A^1_{x:\overline{n}|}}{\ddot{a}_{x:\overline{h}|}}$.

注 一般地,

$$\text{完全离散险种的年均衡净保费}=\frac{\text{对应险种的精算现值}}{\text{缴费期对应的期初生存年金}}.$$

第 5 章 净准备金理论

5.1 确定净准备金的准则

定义 5.1 (未来损失量)

在 t 时刻的未来损失量记为 ${}_tL$. 若在 t 时刻个体 (x) 还活着, 即 $T(x)>t$, 则

$$ {}_tL = \text{“未来需支付的保险金在 } t \text{ 时刻的现值” 减去 “未来支付的保费在} t \text{时刻的总现值”}. $$

若 t 时刻 (x) 已经死亡, 则 ${}_tL=0$.

1. 对完全连续的终身寿险, 年均衡净保费为 $\overline{P}(\overline{A}_x)=\frac{\overline{A}_x}{\overline{a}_x}$,
$$ {}_tL=(\nu^{T(x)-t}-\overline{P}(\overline{A}_x)\overline{a}_{\overline{T(x)-t}|})I_{\{T(x)>t\}}. $$
2. 对完全离散的终身寿险, 年均衡净保费为 $P_x=\frac{A_x}{\ddot{a}_x}$,
$$ {}_kL=(\nu^{K(x)+1-k}-P_x\ddot{a}_{\overline{K(x)+1-k}|})I_{\{K(x)>k\}}. $$

♣

命题 5.1

t 时刻的准备金用 ${}_tV$ 表示.

- 平衡准则: ${}_tV=E({}_tL|T(x)>t)$;
- 指数准则: 给定 $a>0$, 由 $e^{a\cdot {}_tV}=E(e^{a\cdot {}_tL}|T(x)>t)$ 确定净准备金 ${}_tV$;
- 分位数准则: 给定水平 $\alpha\in(0,1)$, 由 $P({}_tL>{}_tV|T(x)>t)=\alpha$ 确定净准备金 ${}_tV$.

♠

注

1. 分位数准则下, 保险人越怕风险, 则 α 越小, ${}_tV$ 越大即净准备金额越大;
2. 指数准则下,
$$ {}_tV=\frac{1}{a}\ln E(e^{a\cdot {}_tL}|T(x)>t). $$
对 a 求偏导数得
$$ \frac{\partial {}_tV}{\partial a}=\frac{\frac{a}{E(e^{a\cdot {}_tL}|T(x)>t)}E(e^{a\cdot {}_tL}{}_tL|T(x)>t)-\ln E(e^{a\cdot {}_tL}|T(x)>t)}{a^2}>0. $$
所以, a 越大, 净准备金 ${}_tV$ 越大, 保险人越怕风险. 并且
$$ \begin{aligned} {}_tV &= \frac{1}{a}\ln E(e^{a\cdot {}_tV}|T(x)>t) > \frac{1}{a}E(\ln e^{a\cdot {}_tV}|T(x)>t) \\ &= E({}_tL_x|T(x)>t) = {}_t\widetilde{V} = \text{平衡准则下的净准备金}. \end{aligned} $$
即指数准则适用于规避风险的保险人. 事实上, 容易验证 $\lim_{a\downarrow 0}{}_tV={}_t\widetilde{V}$.

5.2 完全连续险种在平衡准则下的净准备金

5.2.1 平衡准则下完全连续的终身寿险的净准备金

命题 5.2

1. 未来损失量

$$
\begin{aligned}
{}_tL &= (\nu^{T(x)-t} - \overline{P}(\overline{A}_x)\overline{a}_{\overline{T(x)-t}|})I_{\{T(x)>t\}} \\
&= [(1+\frac{\overline{P}(\overline{A}_x)}{\delta})\nu^{T(x)-t} - \frac{\overline{P}(\overline{A}_x)}{\delta}]I_{\{T(x)>t\}} \\
&= [\frac{1}{\delta\overline{a}_x}\nu^{T(x)-t} - \frac{\overline{P}(\overline{A}_x)}{\delta}]I_{\{T(x)>t\}}.
\end{aligned}
$$

2. 在平衡准则下

$$
\begin{aligned}
{}_t\overline{V}(\overline{A}_x) &= E({}_tL_x|T(x)>t) \\
&= E(\nu^{T(x+t)}) - \overline{P}(\overline{A}_x)E(\overline{a}_{\overline{T(x+t)}|}) \\
&= \overline{A}_{x+t} - \overline{P}(\overline{A}_x)\overline{a}_{x+t} \\
&= \frac{\overline{a}_x - \overline{a}_{x+t}}{\overline{a}_x}.
\end{aligned}
$$

3. 未来损失量 ${}_tL$ 的方差

$$
D({}_tL|T(x)>t) = \frac{1}{(\delta\overline{a}_x)^2}D(\nu^{T(x+t)}) = \frac{{}^2\overline{A}_{x+t} - (\overline{A}_{x+t})^2}{(\delta\overline{a}_x)^2} = \frac{{}^2\overline{A}_{x+t} - (\overline{A}_{x+t})^2}{(1-\overline{A}_x)^2}.
$$

♠

例题 5.1 设 $\mu(t)=\mu$, 利息力为 δ, 某个体 (x) 买了一份完全连续的终身寿险.

(1) 求 ${}_tp_x$;

(2) 写出签单损失量 L;

(3) 在平衡准则下求年均衡净保费;

(4) 求 DL;

(5) 写出 t 时刻的未来损失量 ${}_tL$;

(6) 在平衡准则下求 t 时刻的净准备金 ${}_t\overline{V}(\overline{A}_x)$;

(7) 求 $D({}_tL)$.

解

(1) ${}_tp_x = e^{-\int_x^{x+t}\mu(s)ds} = e^{-\int_x^{x+t}\mu ds} = e^{-\mu t},\ t\geq 0.$

(2) $L = \nu^{T(x)} - \overline{P}(\overline{A}_x)\overline{a}_{\overline{T(x)}|}$.

(3) $0 = EL = \overline{A}_x - \overline{P}(\overline{A}_x)\overline{a}_x$, 故 $\overline{P}(\overline{A}_x) = \frac{\overline{A}_x}{\overline{a}_x}$,

注意到 $\overline{A}_x = \frac{\mu}{\mu+\delta}$, $\overline{a}_x = \frac{1}{\mu+\delta}$, 故 $\overline{P}(\overline{A}_x) = \frac{\overline{A}_x}{\overline{a}_x} = \mu$.

(4) $DL = \frac{{}^2\overline{A}_x - (\overline{A}_x)^2}{(\delta\overline{a}_x)^2} = \frac{{}^2\overline{A}_x - (\overline{A}_x)^2}{(1-\overline{A}_x)^2} = \frac{\frac{\mu}{\mu+2\delta} - (\frac{\mu}{\mu+\delta})^2}{(1-\frac{\mu}{\mu+\delta})^2}$.

(5) t 时刻的未来损失量 ${}_tL = (\nu^{T(x)-t} - \overline{P}(\overline{A}_x)\overline{a}_{\overline{T(x)-t}|})I_{\{T(x)>t\}}$.

(6) t 时刻的净准备金 ${}_t\overline{V}(\overline{A}_x) = \frac{\overline{a}_x - \overline{a}_{x+t}}{\overline{a}_x} = 0$.

(7) $D({}_tL) = \frac{{}^2\overline{A}_{x+t} - (\overline{A}_{x+t})^2}{(1-\overline{A}_x)^2} = \frac{\frac{\mu}{\mu+2\delta} - (\frac{\mu}{\mu+\delta})^2}{(1-\frac{\mu}{\mu+\delta})^2}$.

5.3 完全离散险种的净准备金

5.3.1 平衡准则下完全离散的终身寿险的净准备金

命题 5.3

1. 未来损失量

$$\begin{aligned}{}_kL &= (\nu^{K(x)-k+1} - P_x\ddot{a}_{\overline{K(x)-k+1|}})I_{\{K(x)\geq k\}} \\ &= [(1+\frac{P_x}{d})\nu^{K(x)-k+1} - \frac{P_x}{d}]I_{\{K(x)\geq k\}} \\ &= [\frac{1}{d\ddot{a}_x}\nu^{K(x)-k+1} - \frac{P_x}{d}]I_{\{K(x)\geq k\}}.\end{aligned}$$

2. 在平衡准则下

$$\begin{aligned}{}_kV(A_x) &= E({}_kL|T(x)>k) \\ &= E(\nu^{K(x+k)+1}) - P_xE(\ddot{a}_{\overline{K(x+k)+1|}}) \\ &= A_{x+k} - P_x\ddot{a}_{x+k} \\ &= \frac{\ddot{a}_x - \ddot{a}_{x+k}}{\ddot{a}_x}.\end{aligned}$$

3. 未来损失量 ${}_kL$ 的方差

$$D({}_kL|T(x)>k) = \frac{1}{(d\ddot{a}_x)^2}D(\nu^{K(x+k)+1}) = \frac{{}^2A_{x+k} - (A_{x+k})^2}{(d\ddot{a}_x)^2} = \frac{{}^2A_{x+k} - (A_{x+k})^2}{(1-A_x)^2}.$$

♠

例题 5.2 某人现年 20 岁, 设 ${}_{k|}q_{20} = \frac{1}{2^{k+1}}, k=0,1,2,...$, 利率 $i=0.05$. 考虑 5 年后的净准备金.

(1) 写出签单损失量 L;

(2) 在平衡准则下计算年均衡净保费;

(3) 求 $D(L)$;

(4) 写出 5 年后的未来损失量 ${}_5L$;

(5) 在平衡准则下计算 5 年后的净准备金 ${}_5V(A_{20})$;

(6) 计算 $D({}_5L|T(20)\geq 5)$.

(提示: 由几何分布具有无记忆性可推导出 ${}_{k|}q_{25} = \frac{1}{2^{k+1}}, k=0,1,2,....$)

解

(1) $L = \nu^{K(x)+1} - P_x\ddot{a}_{\overline{K(x)+1|}}$.

(2) $0 = E(L) = A_{20} - P_{20}\ddot{a}_{20}$, 故 $P_{20} = \frac{A_{20}}{\ddot{a}_{20}} = \frac{dA_{20}}{1-A_{20}}$,
注意到 $A_{20} = \sum_{k=0}^{\infty}\nu^{k+1}{}_{k|}q_{20} = \sum_{k=0}^{\infty}\nu^{k+1}\frac{1}{2^{k+1}} = \frac{\nu}{2-\nu}$,
从而 $P_{20} = \frac{dA_{20}}{1-A_{20}} = \frac{\nu}{2}$.

(3) $D(L) = \frac{{}^2A_{20}-(A_{20})^2}{(1-A_{20})^2} = \frac{\frac{\nu^2}{2-\nu^2}-\left(\frac{\nu}{2-\nu}\right)^2}{1-\frac{\nu}{2-\nu}}$.

(4) ${}_5L = (\nu^{K(20)+1-5} - P_{20}\ddot{a}_{\overline{K(20)+1-5|}})I_{\{K(20)\geq 5\}}$.

(5) ${}_5V(A_{20}) = \frac{\ddot{a}_{20}-\ddot{a}_{25}}{\ddot{a}_{20}}$, 其中 $\ddot{a}_{20} = \frac{1-A_{20}}{d}$, $\ddot{a}_{25} = \frac{1-A_{25}}{d}$,
$A_{25} = \sum_{k=0}^{\infty}\nu^{k+1}{}_{k|}q_{25} = \sum_{k=0}^{\infty}\nu^{k+1}\frac{1}{2^{k+1}} = A_{20}$,
于是 $\ddot{a}_{25} = \frac{1-A_{25}}{d} = \frac{1-A_{20}}{d} = \ddot{a}_{20}$, 所以 ${}_5V(A_{20}) = 0$.

(6) $D({}_5L|T(20)\geq 5) = \frac{{}^2A_{25}-(A_{25})^2}{(1-A_{20})^2} = \frac{{}^2A_{20}-(A_{20})^2}{(1-A_{20})^2} = D(L)$.