

# Statistika a spolehlivost v lékařství

14. prosince 2011

## Spolehlivost - 4. cvičení

### Markovovy modely

Výpočet spolehlivosti opravovaných soustav nebo soustav se zálohováním bývá složitý. Pokud mají doby poruch a doby obnov exponenciální rozdělení, je výhodné použít Markovův model. V teorii Markovových procesů se omezíme na základní vlastnosti potřebné pro výpočet spolehlivosti soustav, teorie Markovových procesů je popsána v početné literatuře.

Markovovy modely jsou funkce dvou náhodných proměnných, stavu soustavy a doby nebo jiné veličiny, v závislosti na které stav sledujeme. Obě veličiny mohou být spojité nebo diskrétní, tomu odpovídají čtyři druhy modelů.

**Def: Markovův řetězec** : model s diskrétními stavy a diskrétním časem.

**Def: Markovův proces** : model s diskrétními stavy a spojitým časem.

**Def: Markovův model** : množina pravděpodobností udávajících pravděpodobnost přechodu z nějakého výchozího stavu do nějakého následujícího stavu. Pravděpodobnost závisí pouze na těchto dvou stavech a je zcela nezávislá na všech minulých stavech, kterými proces prošel.

Pro sestavení Markovova modelu se nejprve definují vzájemně se vylučující stavy soustavy. Soustava Markovových stavových rovnic popisuje pravděpodobnostní přechody z počátečních stavů do konečných stavů. Za předpokladů :

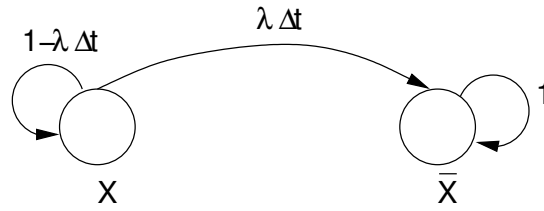
1. Pravděpodobnost přechodu z jednoho stavu do jiného v časovém intervalu  $\Delta t$  je rovna součinu  $\lambda_i(t) \cdot \Delta t$ , kde  $\lambda_i(t)$  je intenzita pravděpodobnosti přechodu (hazard) příslušná ke dvěma stavům, mezi kterými přechod probíhá.
2. Pravděpodobnosti více než jednoho přechodu v časovém intervalu  $\Delta t$  jsou řádově menší a lze je zanedbat.

**Def: Homogenní model** : všechna  $\lambda_i(t) = \lambda_i$  jsou konstantní.

**Def: Nehomogenní model** : některá  $\lambda_i(t)$  je funkcí času.

Markovovy modely lze názorně vyjádřit orientovaným grafem (Markovův graf). Uzly grafu představují stavy soustavy, orientované hrany grafu označené pravděpodobnostmi přechodu udávají možné přechody.

Mějme soustavu s jediným neopravitelným prvkem. Pravděpodobnost bezporuchového stavu  $x$  v čase  $t + \Delta t$  označme  $P_x(t + \Delta t)$ . Podobně pravděpodobnost, že soustava bude v poruchovém stavu  $\bar{x}$  označíme  $P_{\bar{x}}(t + \Delta t)$ .



Markovův graf

Pro pravděpodobnosti jednotlivých stavů napíšeme rovnice

$$\begin{aligned} P_x(t + \Delta t) &= (1 - \lambda(t)\Delta t) \cdot P_x(t), \\ P_{\bar{x}}(t + \Delta t) &= \lambda(t)\Delta t \cdot P_x(t) + P_{\bar{x}}(t), \end{aligned}$$

které přepíšeme do maticové rovnice

$$\begin{bmatrix} P_x(t + \Delta t) \\ P_{\bar{x}}(t + \Delta t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \lambda(t)\Delta t & 0 \\ \lambda(t)\Delta t & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_x(t) \\ P_{\bar{x}}(t) \end{bmatrix}.$$

Získáme *matici pravděpodobností přechodu*, kterou lze sestavit přímo z Markovova grafu. Rovnice lze upravit na tvar :

$$\begin{aligned} \frac{P_x(t + \Delta t) - P_x(t)}{\Delta t} &= -\lambda(t)P_x(t), \\ \frac{P_{\bar{x}}(t + \Delta t) - P_{\bar{x}}(t)}{\Delta t} &= \lambda(t)P_x(t). \end{aligned}$$

Zavedením limity pro  $\Delta t \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_x(t + \Delta t) - P_x(t)}{\Delta t} &= -\lambda(t)P_x(t), \\ \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{\bar{x}}(t + \Delta t) - P_{\bar{x}}(t)}{\Delta t} &= \lambda(t)P_x(t), \end{aligned}$$

získáme soustavu diferenciálních rovnic

$$\begin{aligned} \dot{P}_x &= -\lambda(t)P_x(t), \\ \dot{P}_{\bar{x}} &= \lambda(t)P_x(t). \end{aligned}$$

Obvyklé počáteční podmínky jsou  $P_x(0) = 1$  a  $P_{\bar{x}}(0) = 0$ . První rovnici lze řešit samostatně

$$\begin{aligned} \frac{dP_x}{dt} &= -\lambda(t)P_x(t), \\ \frac{1}{P_x(t)} dP_x &= -\lambda(t)dt, \\ \ln P_x(t) &= K \int_0^t -\lambda(t)dt, \\ P_x(t) &= K e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}. \end{aligned}$$

Dosazením  $P_x(0) = 1$  získáme vztah pro pravděpodobnost bezporuchového provozu

$$R(t) = P_x(t) = e^{\int_0^t -\lambda(t)dt}.$$

Řešením druhé rovnice dostaneme

$$Q(t) = P_{\bar{x}}(t) = 1 - e^{\int_0^t -\lambda(t)dt}.$$

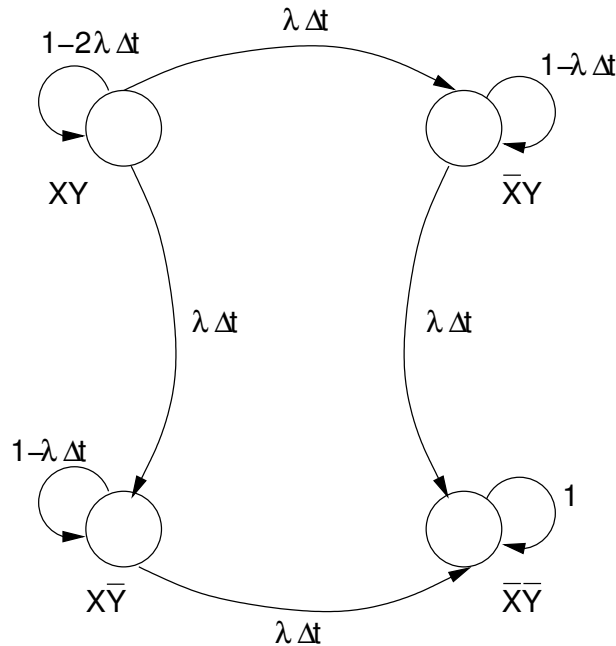
Pro  $\lambda(t) = \lambda$  vyjádříme soustavu diferenciálních rovnic maticovým zápisem

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_x(t) \\ \dot{P}_{\bar{x}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & 0 \\ \lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x(t) \\ P_{\bar{x}}(t) \end{bmatrix}.$$

Získáme *matici intenzit*. Matice intenzit není stochastická, součet prvků v každém sloupci je roven nule. Matici intenzit lze také napsat přímo z Markovova grafu.

- **Příklad 1 (Soustava 2 prvky, každý prvek 2 stavy)** *Mějme soustavu se dvěma neopravitelnými prvky ( $X$  a  $Y$ ), každý prvek má dva stavy (bezporuchový stav, porucha), intenzita poruch je pro oba prvky stejná a konstantní  $\lambda_i(t) = \lambda$ . Přechod ze stavu  $XY$  do stavu  $\overline{XY}$  se nepředpokládá a prakticky nenastane. Nakreslete Markovův graf, sestavte matici pravděpodobností přechodu a matici intenzit.*

**Řešení:** Markovův graf



Matice pravděpodobností přechodu:

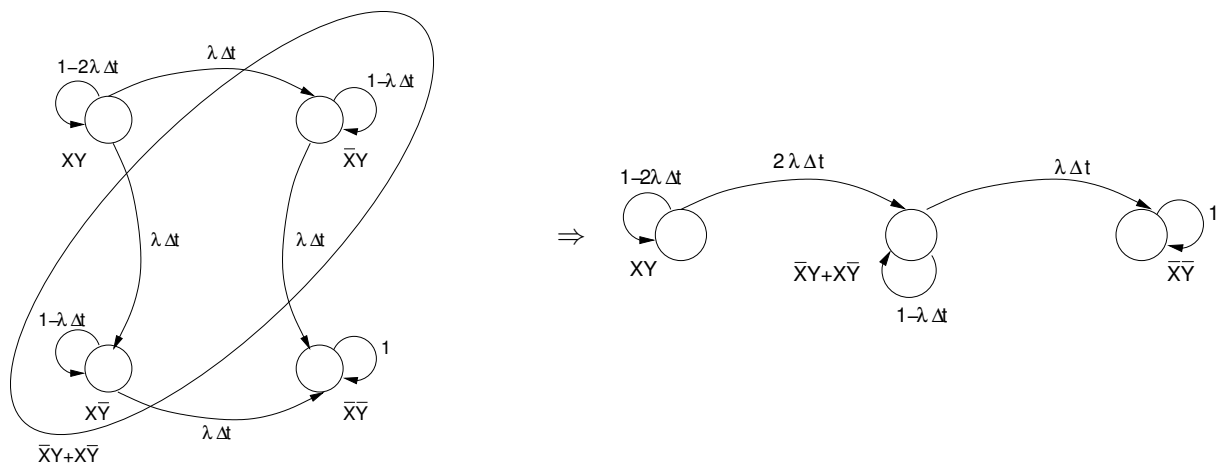
$$\begin{bmatrix} P_{XY} \\ P_{\bar{X}Y} \\ P_{X\bar{Y}} \\ P_{\bar{X}\bar{Y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - 2\lambda \Delta t & 0 & 0 & 0 \\ \lambda \Delta t & 1 - \lambda \Delta t & 0 & 0 \\ \lambda \Delta t & 0 & 1 - \lambda \Delta t & 0 \\ 0 & \lambda \Delta t & \lambda \Delta t & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{XY} \\ P_{\bar{X}Y} \\ P_{X\bar{Y}} \\ P_{\bar{X}\bar{Y}} \end{bmatrix}.$$

Matice intenzit:

$$\begin{bmatrix} \dot{P}_{XY} \\ \dot{P}_{\bar{X}Y} \\ \dot{P}_{X\bar{Y}} \\ \dot{P}_{\bar{X}\bar{Y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & -\lambda & 0 & 0 \\ \lambda & 0 & -\lambda & 0 \\ 0 & \lambda & \lambda & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{XY} \\ P_{\bar{X}Y} \\ P_{X\bar{Y}} \\ P_{\bar{X}\bar{Y}} \end{bmatrix}.$$

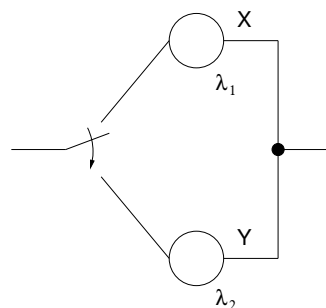
### Slučování stavů

Složitost Markovova modelu závisí na počtu stavů soustavy. Soustava s  $m$  stavy bude popsána  $m$  diferenciálními rovnicemi prvního řádu. Pro soustavu s  $n$  dvoustavovými prvky je počet stavů soustavy  $m = 2^n$ . Obecně pro prvky s  $k$  možnými stavy je  $m = k^n$ . Počet diferenciálních rovnic roste velmi rychle. Při výpočtu bezporuchovosti soustavy můžeme rozlišovat pouze stavy určené počtem porouchaných prvků a nezajímat se o to, které prvky mají poruchu. Počet stavů soustavy a počet diferenciálních rovnic se tím zmenší z  $2^n$  na  $n + 1$ . Zjednodušení ukážeme na předchozím příkladě. Stavy  $X\bar{Y}$ ,  $\bar{X}Y$  sloučíme do jediného stavu  $X\bar{Y} + \bar{X}Y$ .

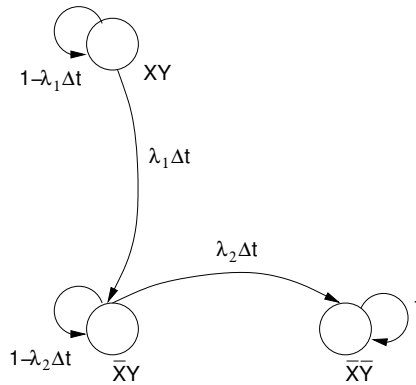


Ze stavu  $XY$  do stavu  $X\bar{Y} + \bar{X}Y$  se lze dostat buď poruchou prvku  $X$  nebo poruchou prvku  $Y$ , proto pravděpodobnosti přechodu sčítáme. Ze stavu  $X\bar{Y} + \bar{X}Y$  do stavu  $\bar{X}\bar{Y}$  se dostane v případě, že zbylý prvek bude mít poruchu, proto je pravděpodobnost přechodu rovna  $\lambda\Delta t$  (pouze jeden z nich může mít poruchu). Snadno lze nahlédnout, že aby došlo k zjednodušení musejí být intenzity ze stavů  $\bar{X}Y$  nebo  $X\bar{Y}$  do  $\bar{X}\bar{Y}$  stejné. Intenzity ze stavu  $XY$  do stavu  $\bar{X}Y$  a  $X\bar{Y}$  mohou být různé.

- **Příklad 2 (Zálohování s přepínáním)** Mějme soustavu se zálohováním přepínáním, prvek v záloze nestárne. Při poruše prvku  $X$  dojde k přepnutí na prvek  $Y$ . U prvku  $Y$  tedy nenastane porucha dříve než u prvku  $X$ . Intenzita poruchy prvku  $X$  je  $\lambda_1$  a intenzita poruchy prvku  $Y$  je  $\lambda_2$ . Nakreslete Markovův graf.



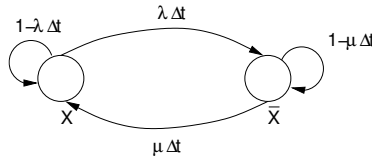
**Řešení:**



- **Příklad 3 (Soustava s opravou)** Mějme jedno prvkovou soustavu s opravou. Porucha nastává s intenzitou  $\lambda$  a porouchaný prvek je opraven s intenzitou  $\mu$ . Nakreslete Markovův graf, sestavte matici intenzit a vypočítejte pravděpodobnost bezporuchového provozu a pravděpodobnost poruchy v čase  $t$   $P_x(t) = ?$  a  $P_{\bar{x}} = ?$  pro počáteční podmínky  $P_x(0) = 1$  a  $P_{\bar{x}}(0) = 0$ .



**Řešení:**



$$\begin{bmatrix} \dot{P}_x \\ \dot{P}_{\bar{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ \lambda & -\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_{\bar{x}} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} P_x \\ P_{\bar{x}} \end{bmatrix}$$

výpočet vlastních čísel  $\det(\mathbf{A} - \mathbf{S}) = 0$  :

$$\begin{bmatrix} -\lambda - s & \mu \\ \lambda & -\mu - s \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow s(s + \lambda + \mu) = 0 \Rightarrow \begin{matrix} s_1 = -(\lambda + \mu) \\ s_2 = 0 \end{matrix}$$

výpočet vlastních vektorů

$s_1$  :

$$\begin{bmatrix} -\lambda + \mu + \lambda & \mu \\ \lambda & -\mu + \mu - \lambda \end{bmatrix} \sim \begin{bmatrix} \mu & \mu \\ \lambda & \lambda \end{bmatrix} \Rightarrow v_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} t.$$

$s_2$  :

$$\begin{bmatrix} -\lambda & \mu \\ \lambda & -\mu \end{bmatrix} \Rightarrow v_2 = \begin{bmatrix} \frac{\mu}{\lambda} \\ 1 \end{bmatrix} t.$$

$$P_x = C_1 e^{-(\mu+\lambda)t} + C_2 \frac{\mu}{\lambda}$$

$$P_{\bar{x}} = -C_1 e^{-(\mu+\lambda)t} + C_2$$

počáteční podmínky :

$$\begin{aligned} P_{\bar{x}}(0) = 0 & \quad C_2 - C_1 = 0 & \Rightarrow C_1 = C_2 \\ P_x(t) = 1 & \quad C_2 \frac{\mu}{\lambda} + C_1 = 0 \sim C_1 \left( \frac{\mu + \lambda}{\lambda} \right) = 1 & \Rightarrow C_1 = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_x(t) &= \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \\ P_{\bar{x}}(0) &= -\frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda}. \end{aligned}$$