

Algebra a diskrétna matematika

Prehľad z 9. prednášky

Algebraické štruktúry - Úvod

Binárna relácia

Nech M je neprázdna množina a nech $M \times M$ je **kartézsky súčin** množiny M samej so sebou, t.j. $M \times M = \{(x, y); x, y \in M\}$.

Pod **binárnou reláciou** na množine M rozumieme ľubovoľnú podmnožinu súčinu $M \times M$. Formálne, \mathcal{R} je binárna relácia na M , ak $\mathcal{R} \subseteq M \times M$.

Vzťah medzi x a y v relácii \mathcal{R} zapisujeme $(x, y) \in \mathcal{R}$ alebo $x\mathcal{R}y$.

Ak M má veľkosť n , body v relácii môžeme znázorniť vyznačením zodpovedajúcich bodov na mriežke $n \times n$ alebo pomocou orientovaného grafu s n vrcholmi, v ktorom je dvojica bodov $x\mathcal{R}y$ reprezentovaná šípkou z x do y . Reláciu na n prvkovej množine $M = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ je tiež možné popísať pomocou *matice susednosti* A relácie \mathcal{R} , pričom $A_{n \times n} = (a_{ij})$, kde $a_{ij} = 1$, ak $x_i\mathcal{R}x_j$, inak $a_{ij} = 0$.

Príklad 1: Ilustrácia binárnych relácií na daných množinách.

- a) $M = \{0, 1, 2\}$, $\mathcal{R} = \{(0, 0), (1, 0), (1, 1), (1, 2), (2, 0), (2, 2)\}$.
- b) $M = \{a, b, c, d, e\}$, $\mathcal{R} = \{(a, b), (a, c), (b, b), (c, d), (e, b), (e, e)\}$
- c) $M = \mathbb{Z}$, $\mathcal{R} = \{(z, z + 9); z \in \mathbb{Z}\}$.
- d) \mathcal{R} na \mathbb{R} : $x\mathcal{R}y \Leftrightarrow y = x^3 - x$

Poznámka: Funkcia je špeciálnym typom relácie.

Vlastnosti binárnej relácie

Hovoríme, že relácia \mathcal{R} je na množine M

- (R) **reflexívna**, ak pre každé $x \in M$ platí $x\mathcal{R}x$
- (S) **symetrická**, ak $x\mathcal{R}y$ implikuje $y\mathcal{R}x$ pre každé $x, y \in M$
- (A) **antisymetrická**, ak $x\mathcal{R}y$ a $y\mathcal{R}x$ implikuje $x = y$ pre každé $x, y \in M$
- (T) **tranzitívna**, ak $x\mathcal{R}y$ a $y\mathcal{R}z$ implikuje $x\mathcal{R}z$ pre každé $x, y, z \in M$

Príklad 2: Overte vlastnosti relácií na daných množinách

- a) $M = \{0, 1, 2\}$, $\mathcal{R} = \{(0, 0), (1, 0), (1, 1), (1, 2), (2, 0), (2, 2)\}$
- b) \mathcal{R} na \mathbb{R} : $x\mathcal{R}y \Leftrightarrow |x - y| \geq 6$
- c) \mathcal{R} na \mathbb{Z} : $x\mathcal{R}y \Leftrightarrow x \leq y$
- d) M je množina všetkých priamok v rovine a \mathcal{R} je relácia rovnobežnosti priamok, t. j. $\forall p, q \in M; p\mathcal{R}q \Leftrightarrow p \parallel q$

Odpoved':

- a) (R), (A), (T)
- b) (S)
- c) (R), (A), (T)
- d) (R), (S), (T)

Čiastočne usporiadaná množina (poset)

Binárna relácia $\mathcal{R} \subseteq M \times M$ sa nazýva **čiastočným usporiadaním** na M , ak je na M *reflexívna*, *antisymetrická* a *tranzitívna*.

Ak \mathcal{R} je čiastočné usporiadanie na M , tak namiesto $x\mathcal{R}y$ používame označenie $x \preceq_{\mathcal{R}} y$ alebo sa index \mathcal{R} vynecháva.

Často sa jednoducho píše $x \leq y$.

Vlastnosti z definície čiastočného usporiadania potom majú tvar

- (R) $x \leq x$ (reflexívnosť)
- (A) ak $x \leq y$ a $y \leq x$, tak $x = y$ (antisymetria)
- (T) ak $x \leq y$ a $y \leq z$, tak $x \leq z$ (tranzitívnosť)

pre každé $x, y, z \in M$.

Dvojicu (M, \leq) , kde \leq je binárna relácia čiastočného usporiadania, nazývame **čiastočne usporiadaná množina**.

Príklad 3: Nech S je neprázdna množina a nech M je ľubovoľná množina *podmnožín* množiny S . Nech \leq je binárna relácia inklúzie, t.j. ak $X, Y \in M$, tak $X \leq Y$, ak X je podmnožinou množiny Y . Potom (M, \leq) je čiastočne usporiadaná množina.

Príklad 4: Nech M je ľubovoľná neprázdna podmnožina množiny \mathbb{N} a nech pre každé $x, y \in M$ symbol $x \leq y$ označuje fakt, že číslo x je deliteľom čísla y . Potom (M, \leq) je opäť čiastočne usporiadaná množina.

Ak (M, \leq) je čiastočne usporiadaná množina, tak dva rôzne prvky $x, y \in M$ sú **porovnateľné**, ak buď $x \leq y$, alebo $y \leq x$.

(Oba vzt'ahy nemôžu platiť súčasne pre $x \neq y$.)

Budeme písať $x < y$, ak $x \leq y$ a $x \neq y$.

- Prvok $a \in M$ sa nazýva **najmenší**, ak $a \leq x$ pre každé $x \in M$.
- Prvok $b \in M$ sa nazýva **najväčší**, ak $x \leq b$ pre každé $x \in M$.
- Prvok $a \in M$ je **minimálny**, ak neexistuje žiadne $x \in M$, že $x < a$.
- Prvok $b \in M$ je **maximálny**, ak neexistuje žiadne $x \in M$, že $b < x$.

Ak v (M, \leq) existuje najmenší (najväčší) prvok, tak tento je určený *jednoznačne*.

Najmenší (najväčší) prvok v (M, \leq) je zároveň minimálnym (maximálnym) prvkom; vo všeobecnosti to neplatí obrátene.

Ak (M, \leq) obsahuje viac ako jeden minimálny (maximálny) prvok, tak žiadne dva minimálne (maximálne) prvky nemôžu byť porovnateľné.

Príklad 5: Pre čiastočne usporiadanú množinu $(\{1, 2, \dots, 10\}, |)$, kde $x | y$ označuje fakt, že x delí y , nájdite všetky minimálne a maximálne prvky, najmenší a najväčší prvok.

Odpoveď: Najmenší a zároveň minimálny prvok je 1, maximálne prvky sú 6, 7, 8, 9, 10 a najväčší prvok neexistuje.

Čiastočne usporiadané množiny znázorňuje pomocou **Hasseho diagramu**.

V Hasseho diagrame čiastočne usporiadanej množiny (M, \leq) :

- sa nevyskytujú slučky,
- spojnice je medzi x, y iba ak x je bezprostredným predchodcom prvku y , t.j. $x < y$ a neexistuje žiadne $z \in M$, že $x < z < y$,
- ak $x < y$, tak x sa umiestňuje pod y .

Z Hasseho diagramu je možné jednoznačne zrekonštruovať reláciu \leq čiastočného uporiadania na množine M .

Zväzy

Nech (M, \leq) je čiastočne usporiadaná množina a nech $x, y \in M$.

- Prvok $z \in M$ je **dolným ohraňčením** prvkov x a y , ak $z \leq x$ a $z \leq y$.
- Prvok $c \in M$ je **najväčším dolným ohraňčením** prvkov x a y , ak $c \leq x$, $c \leq y$, a ak $z \leq c$ pre každé dolné ohraňčenie z prvkov x, y .

Označenie: $c = \inf(x, y)$, alebo $c = x \wedge y$, *priesek* x a y .

- Prvok $z \in M$ je **horným ohraňčením** prvkov x a y , ak $x \leq z$ a $y \leq z$.
- Prvok $d \in M$ je **najmenším horným ohraňčením** prvkov x a y , ak $x \leq d$, $y \leq d$, a ak $d \leq z$ pre každé horné ohraňčenie z prvkov x, y .

Označenie: $d = \sup(x, y)$, alebo $d = x \vee y$, *spojenie* prvkov x a y .

Čiastočne usporiadaná množina (M, \leq) sa nazýva **zväz**, ak pre každé $x, y \in M$ existuje ich priesek $x \wedge y$ a aj ich spojenie $x \vee y$.

Príklad 6: Nech $M = \{0, 1, 2\} \times \{0, 1\}$ a relácia usporiadania \leq je daná predpisom $(a, b) \leq (c, d) \Leftrightarrow a \leq c$ a $b \leq d$. Dvojica (M, \leq) tvorí zväz.

Príklad 7: Nech $(\mathbb{N}, |)$ je čiastočne usporiadaná množina, kde \mathbb{N} je množina prirodzených čísel a $x | y$ označuje fakt, že x delí y . Potom $x \wedge y$ je najväčší spoločný deliteľ a $x \vee y$ je najmenší spoločný násobok čísel x a y ; čiastočne usporiadaná množina $(\mathbb{N}, |)$ je tiež zväz.

Príklad 8: Nech S je neprázdna množina a nech 2^S označuje množinu *všetkých* podmnožín množiny S . V čiastočne usporiadanej množine $(2^S, \subseteq)$ je priesek dvoch prvkov rovný prieniku a spojenie je rovné zjednoteniu príslušných množín a teda $(2^S, \subseteq)$ je zväz.

Takéto zväzy sa nazývajú **boolovské**.

Čiastočne usporiadaná množina (M, \leq) sa nazýva **ret'azec**, ak pre každé $x, y \in M$ platí, že $x \leq y$ alebo $y \leq x$; skrátené, ak každé dva prvky v M sú *porovnateľné*.

Príslušné čiastočné usporiadanie \leq sa nazýva aj **lineárne**.

Tvrdenie 1: Každý reťazec je zväz.

Príklad 9: Dané čiastočne usporiadané množiny sú reťazce.

a) $(\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \leq)$

b) $M = \{1, 2, 3, 4\}, \mathcal{R} = \{(2, 3), (2, 1), (1, 4), (1, 3), (2, 4), (4, 3)\}$

Binárna operácia a algebraická štruktúra

Binárna operácia je "dvojčlenná" operácia, ktorá každej usporiadanej dvojici prvkov z nejakej množiny priraduje jediný tretí prvok z tej istej množiny; t. j. binárna operácia φ na množine M je zobrazenie $\varphi : M \times M \rightarrow M$.

Z faktu, že φ je zobrazenie vyplýva, že

- každá binárna operácia je *uzavretá*; t. j. $\forall x, y \in M : \varphi(x, y) \in M$,
- výsledok operácie je definovaný pre *každú* usporiadanú dvojicu z $M \times M$, t. j. $\forall x, y \in M \exists z \in M : \varphi(x, y) = z$.

Známe príklady:

Číselné operácie: sčítanie, odčítanie, násobenie, max, min.

Množinové operácie: prienik, zjednotenie, rozdiel.

Označenie: Ak sa nejedná o známe operácie, najčastejšie používané označenie binárnej operácie je $*$, \circ , \oplus alebo \otimes ; píšeme $x * y, x \circ y$ atď.

Vlastnosti binárnych operácií

Nech $*$ je binárna operácia na množine M . Hovoríme, že operácia $*$ je

- **komutatívna**, ak $\forall x, y \in M : x * y = y * x$
- **asociatívna**, ak $\forall x, y, z \in M : (x * y) * z = x * (y * z)$

Nech $*, \circ$ sú dve binárne operácie na M . Hovoríme, že

- operácia $*$ je **zl'ava distributívna** vzhľadom na operáciu \circ , ak $\forall x, y, z \in M : x * (y \circ z) = (x * y) \circ (x * z)$,

- operácia $*$ je **sprava distributívna** vzhľadom na operáciu \circ , ak $\forall x, y, z \in M : (x \circ y) * z = (x * z) \circ (y * z)$,
- operácia $*$ je **distributívna** vzhľadom na operáciu \circ , ak je vzhľadom na \circ distributívna zľava aj sprava.

Neprázdna množina M spolu s jednou alebo viacerými binárnymi operáciami tvorí **algebraickú štruktúru**.

Rozoznávame veľa rôznych algebraických štruktúr podľa toho, aké vlastnosti spĺňajú ich binárne operácie.

Zväz ako algebraická štruktúra

V každom zväze (M, \leq) pre všetky $x, y, z \in M$ platia nasledujúce vzťahy:

$$\begin{array}{ll}
 (1) & x \wedge x = x \qquad \qquad \qquad x \vee x = x \\
 (2) & x \wedge y = y \wedge x \qquad \qquad \qquad x \vee y = y \vee x \\
 (3) & (x \wedge y) \wedge z = x \wedge (y \wedge z) \qquad (x \vee y) \vee z = x \vee (y \vee z) \\
 (4) & (x \wedge y) \vee y = y \qquad \qquad \qquad (x \vee y) \wedge y = y \\
 (5) & x \leq y \Leftrightarrow x \wedge y = x \qquad \qquad \qquad x \leq y \Leftrightarrow x \vee y = y
 \end{array}$$

Dá sa ukázať, že na zväz (M, \leq) je ekvivalentne možné hľadiť aj ako na *algebraickú štruktúru* (M, \wedge, \vee) s dvoma binárnymi operáciami \wedge a \vee : $M \times M \rightarrow M$, ktoré majú vlastnosti (1) – (4).

Príslušné čiastočné usporiadanie je potom definované vzťahom (5).

Načrtneme fakt, že ak (M, \wedge, \vee) je algebraická štruktúra spĺňajúca (1) – (4), tak predpisom (5) je naozaj definované čiastočné usporiadanie.

- Na odvodenie (R) treba ukázať, že $x \leq x$, čiže treba overiť, že $x \wedge x = x$, ale to je vzťah (1).
- Na odvodenie (A) predpokladajme, že $x \leq y$ a $y \leq x$, teda $x \wedge y = x$ a $y \wedge x = y$; potom ale z (2) máme $x = y$, čím dostávame (A).
- Na odvodenie (T) predpokladajme, že $x \leq y$ a $y \leq z$, teda $x \wedge y = x$ a $y \wedge z = y$. Z vlastnosti (3) máme $x \wedge z = (x \wedge y) \wedge z = x \wedge (y \wedge z) = x \wedge y = x$, ale $x \wedge z = x$ znamená, že $x \leq z$, z čoho vyplýva (T).