

第三章关系

陈建文

1. 关系的概念

定义1.1

设 A 与 B 为两个集合。一个从 $A \times B$ 到 $\{T, F\}$ 的映射 R ，称为从 A 到 B 的一个**二元关系**。 $\forall (a, b) \in A \times B$ ，如果 (a, b) 在 R 下的象为 T ，则称 a 与 b 符合关系 R ，记为 aRb ；如果 (a, b) 在 R 下的象为 F ，则称 a 与 b 不符合关系 R ，记为 $a \not R b$ 。如果 $A = B$ ，则称 R 为 A 上的二元关系。

1. 关系的概念

定义1.1

设 A 与 B 为两个集合。一个从 $A \times B$ 到 $\{T, F\}$ 的映射 R ，称为从 A 到 B 的一个**二元关系**。 $\forall (a, b) \in A \times B$ ，如果 (a, b) 在 R 下的象为 T ，则称 a 与 b 符合关系 R ，记为 aRb ；如果 (a, b) 在 R 下的象为 F ，则称 a 与 b 不符合关系 R ，记为 $a \not R b$ 。如果 $A = B$ ，则称 R 为 A 上的二元关系。

例1.1

设集合 $X = \{1, 2\}$ ，则 2^X 上的二元关系 \subseteq 可以定义为一个从 $2^X \times 2^X$ 到 $\{T, F\}$ 的映射，

$$\begin{aligned} \subseteq (\phi, \phi) &= T, \subseteq (\phi, \{1\}) = T, \subseteq (\phi, \{2\}) = T, \subseteq (\phi, \{1, 2\}) = T, \\ \subseteq (\{1\}, \phi) &= F, \subseteq (\{1\}, \{1\}) = T, \subseteq (\{1\}, \{2\}) = F, \subseteq \\ (\{1\}, \{1, 2\}) &= T, \\ \subseteq (\{2\}, \phi) &= F, \subseteq (\{2\}, \{1\}) = F, \subseteq (\{2\}, \{2\}) = T, \subseteq \\ (\{2\}, \{1, 2\}) &= T, \\ \subseteq (\{1, 2\}, \phi) &= F, \subseteq (\{1, 2\}, \{1\}) = F, \subseteq (\{1, 2\}, \{2\}) = F, \subseteq \\ (\{1, 2\}, \{1, 2\}) &= T \end{aligned}$$

1. 关系的概念

定义1.2

设 A 与 B 为两个集合。 $A \times B$ 的任一子集 R 称为从 A 到 B 的一个二元关系。如果 $(a, b) \in R$ ，则称 a 与 b 符合关系 R ，记为 aRb ；如果 $(a, b) \notin R$ ，则称 a 与 b 不符合关系 R ，并记为 $a \not R b$ 。如果 $A = B$ ，则称 R 为 A 上的二元关系。

1. 关系的概念

定义1.2

设 A 与 B 为两个集合。 $A \times B$ 的任一子集 R 称为从 A 到 B 的一个二元关系。如果 $(a, b) \in R$ ，则称 a 与 b 符合关系 R ，记为 aRb ；如果 $(a, b) \notin R$ ，则称 a 与 b 不符合关系 R ，并记为 $a \not R b$ 。如果 $A = B$ ，则称 R 为 A 上的二元关系。

例1.2

设集合 $X = \{1, 2\}$ ，则 2^X 上的二元关系 \subseteq 可以定义为 $2^X \times 2^X$ 的一个子集，

$$\begin{aligned} \subseteq = & \{(\phi, \phi), (\phi, \{1\}), (\phi, \{2\}), (\phi, \{1, 2\}), \\ & (\{1\}, \{1\}), (\{1\}, \{1, 2\}), (\{2\}, \{2\}), (\{2\}, \{1, 2\}), \\ & (\{1, 2\}, \{1, 2\})\} \end{aligned}$$

1. 关系的概念

例1.3

自然数集 \mathbb{N} 上的小于等于关系“ \leq ”是 \mathbb{N} 上的一个二元关系。

1. 关系的概念

例1.3

自然数集 \mathbb{N} 上的小于等于关系“ \leq ”是 \mathbb{N} 上的一个二元关系。

例1.4

设 n 为任一给定的自然数。对任意的两个整数 m, k ，如果 $m - k$ 能被 n 整除，则称 m 与 k 为模 n 同余，并记为 $m \equiv k \pmod{n}$ 。显然， $m \equiv k \pmod{n}$ 当且仅当 m 被 n 除所得到的余数与 k 被 n 除所得到的余数相等。模 n 同余是 \mathbb{Z} 上的一个二元关系。

1. 关系的概念

定义1.3

设 $R \subseteq A \times B$, 集合

$$\{x \in A | \exists y \in B \text{ 使得 } (x, y) \in R\}$$

称为 R 的**定义域**, 记为 $\text{dom}(R)$; 集合

$$\{y \in B | \exists x \in A \text{ 使得 } (x, y) \in R\}$$

称为 R 的**值域**, 记为 $\text{ran}(R)$ 。

1. 关系的概念

定义1.4

设 A_1, A_2, \dots, A_n 为 n 个集合, 一个 $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$ 的子集 R 称为 A_1, A_2, \dots, A_n 间的一个 n 元关系, 每个 A_i 称为 R 的一个域。

The term relation is used here in its accepted mathematical sense. Given sets S_1, S_2, \dots, S_n (not necessarily distinct), R is a relation on these n sets if it is a set of n -tuples each of which has its first element from S_1 , its second element from S_2 , and so on. More concisely, R is a subset of the Cartesian product $S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$.

1	5	9
2	5	7
3	5	2
2	6	12
3	6	3
4	7	1
6	7	1



E. F. Codd.

A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks.
Information Retrieval, 13(6): 1970.

2. 关系的性质

定义2.1

集合 X 上的二元关系 R 称为**自反**的，如果对 X 的任意元素 x 都有 xRx 。

2. 关系的性质

定义2.1

集合 X 上的二元关系 R 称为**自反**的，如果对 X 的任意元素 x 都有 xRx 。

判断下列二元关系是否是自反的。设集合 $X = \{1, 2, 3, 4\}$,

1. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (3, 4)\}$
2. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 1), (1, 2), (2, 2), (2, 4), (3, 3), (4, 4)\}$
3. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 1), (2, 3), (3, 2)\}$
4. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(2, 3)\}$
5. 集合 X 上的恒等关系 $I_X = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4)\}$

2. 关系的性质

定义2.2

集合 X 上的二元关系 R 称为反自反的, 如果对 X 的任意元素 x 都有 $(x, x) \notin R$ 。

2. 关系的性质

定义2.2

集合 X 上的二元关系 R 称为反自反的, 如果对 X 的任意元素 x 都有 $(x, x) \notin R$ 。

判断下列二元关系是否是反自反的。设集合 $X = \{1, 2, 3, 4\}$,

1. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (3, 4)\}$
2. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 1), (1, 2), (2, 2), (2, 4), (3, 3), (4, 4)\}$
3. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 1), (2, 3), (3, 2)\}$
4. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(2, 3)\}$
5. 集合 X 上的恒等关系 $I_X = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4)\}$

2. 关系的性质

定义2.3

集合 X 上的二元关系 R 称为**对称**的，如果对 X 的任意元素 x, y ，只要 xRy 就有 yRx 。

2. 关系的性质

定义2.3

集合 X 上的二元关系 R 称为**对称**的，如果对 X 的任意元素 x, y ，只要 xRy 就有 yRx 。

判断下列二元关系是否是对称的。设集合 $X = \{1, 2, 3, 4\}$ ，

1. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (3, 4)\}$
2. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 1), (1, 2), (2, 2), (2, 4), (3, 3), (4, 4)\}$
3. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 1), (2, 3), (3, 2)\}$
4. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(2, 3)\}$
5. 集合 X 上的恒等关系 $I_X = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4)\}$

2. 关系的性质

定义2.4

集合 X 上的二元关系 R 称为**反对称**的，如果对 X 的任意元素 x, y ， xRy 且 yRx ，则 $x = y$ 。

2. 关系的性质

定义2.4

集合 X 上的二元关系 R 称为**反对称**的，如果对 X 的任意元素 x, y ， xRy 且 yRx ，则 $x = y$ 。

判断下列二元关系是否是反对称的。设集合 $X = \{1, 2, 3, 4\}$,

1. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (3, 4)\}$
2. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 1), (1, 2), (2, 2), (2, 4), (3, 3), (4, 4)\}$
3. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 1), (2, 3), (3, 2)\}$
4. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(2, 3)\}$
5. 集合 X 上的恒等关系 $I_X = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4)\}$

2. 关系的性质

定义2.5

集合 X 上的二元关系 R 称为传递的，如果对 X 的任意元素 x, y, z ，只要 xRy 且 yRz ，就有 xRz 。

2. 关系的性质

定义2.5

集合 X 上的二元关系 R 称为传递的，如果对 X 的任意元素 x, y, z ，只要 xRy 且 yRz ，就有 xRz 。

判断下列二元关系是否是传递的。设集合 $X = \{1, 2, 3, 4\}$,

1. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 2), (1, 3), (1, 4), (2, 3), (2, 4), (3, 4)\}$
2. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 1), (1, 2), (2, 2), (2, 4), (3, 3), (4, 4)\}$
3. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(1, 1), (2, 3), (3, 2)\}$
4. 集合 X 上的二元关系 $R = \{(2, 3)\}$
5. 集合 X 上的恒等关系 $I_X = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4)\}$

习题

以下两个结论哪个正确？

1. 如果 R 与 S 都为集合 X 上传递的二元关系，则 $R \cap S$ 为集合 X 上传递的二元关系。
2. 如果 R 与 S 都为集合 X 上传递的二元关系，则 $R \cup S$ 为集合 X 上传递的二元关系。

习题

设 R 为集合 X 上反自反的和传递的二元关系，证明： R 为 X 上反对称的二元关系。

3. 关系的运算

定义3.1

设 R 为从集合 A 到集合 B 的二元关系, R 的逆 R^{-1} 定义为从集合 B 到集合 A 的二元关系

$$R^{-1} = \{(y, x) | (x, y) \in R\}$$

3. 关系的运算

定义3.1

设 R 为从集合 A 到集合 B 的二元关系， R 的逆 R^{-1} 定义为从集合 B 到集合 A 的二元关系

$$R^{-1} = \{(y, x) | (x, y) \in R\}$$

例3.1

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $R = \{(1, 2), (2, 3), (1, 3)\}$,
则 $R^{-1} = \{(2, 1), (3, 2), (3, 1)\}$ 。

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为对称的往证 $R^{-1} \subseteq R$ 。

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为对称的往证 $R^{-1} \subseteq R$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$,

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为对称的往证 $R^{-1} \subseteq R$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R^{-1}$,

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为对称的往证 $R^{-1} \subseteq R$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R^{-1}$, 则 $(y, x) \in R$,

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为对称的往证 $R^{-1} \subseteq R$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R^{-1}$, 则 $(y, x) \in R$, 由 R 为对称的知,

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为对称的往证 $R^{-1} \subseteq R$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R^{-1}$, 则 $(y, x) \in R$, 由 R 为对称的知, $(x, y) \in R$ 。

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为对称的往证 $R^{-1} \subseteq R$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R^{-1}$, 则 $(y, x) \in R$, 由 R 为对称的知, $(x, y) \in R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 R 为对称的。

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为对称的往证 $R^{-1} \subseteq R$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R^{-1}$, 则 $(y, x) \in R$, 由 R 为对称的知, $(x, y) \in R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 R 为对称的。

对任意的 $x \in X, y \in X$,

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为对称的往证 $R^{-1} \subseteq R$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R^{-1}$, 则 $(y, x) \in R$, 由 R 为对称的知, $(x, y) \in R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 R 为对称的。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R$,

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为对称的往证 $R^{-1} \subseteq R$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R^{-1}$, 则 $(y, x) \in R$, 由 R 为对称的知, $(x, y) \in R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 R 为对称的。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R$, 则 $(y, x) \in R^{-1}$,

3. 关系的运算

定理3.1

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R^{-1} \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为对称的往证 $R^{-1} \subseteq R$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R^{-1}$, 则 $(y, x) \in R$, 由 R 为对称的知, $(x, y) \in R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 R 为对称的。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R$, 则 $(y, x) \in R^{-1}$, 由 $R^{-1} \subseteq R$ 知 $(y, x) \in R$ 。

□

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$,

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$ ，则显然 $R^{-1} \subseteq R$ 。

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$ ，则显然 $R^{-1} \subseteq R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 $R = R^{-1}$ ，

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$ ，则显然 $R^{-1} \subseteq R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 $R = R^{-1}$ ，此时只需证 $R \subseteq R^{-1}$ 。

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$ ，则显然 $R^{-1} \subseteq R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 $R = R^{-1}$ ，此时只需证 $R \subseteq R^{-1}$ 。

对任意的 $x \in X$,

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$ ，则显然 $R^{-1} \subseteq R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 $R = R^{-1}$ ，此时只需证 $R \subseteq R^{-1}$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$,

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$ ，则显然 $R^{-1} \subseteq R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 $R = R^{-1}$ ，此时只需证 $R \subseteq R^{-1}$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$ ，如果 $(x, y) \in R$,

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$ ，则显然 $R^{-1} \subseteq R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 $R = R^{-1}$ ，此时只需证 $R \subseteq R^{-1}$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$ ，如果 $(x, y) \in R$ ，则 $(y, x) \in R^{-1}$ ，

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$ ，则显然 $R^{-1} \subseteq R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 $R = R^{-1}$ ，此时只需证 $R \subseteq R^{-1}$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$ ，如果 $(x, y) \in R$ ，则 $(y, x) \in R^{-1}$ ，由 $R^{-1} \subseteq R$ 知 $(y, x) \in R$ ，

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系，则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$ ，则显然 $R^{-1} \subseteq R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 $R = R^{-1}$ ，此时只需证 $R \subseteq R^{-1}$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$ ，如果 $(x, y) \in R$ ，则 $(y, x) \in R^{-1}$ ，由 $R^{-1} \subseteq R$ 知 $(y, x) \in R$ ，从而 $(x, y) \in R^{-1}$ 。 \square

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$, 则显然 $R^{-1} \subseteq R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 $R = R^{-1}$, 此时只需证 $R \subseteq R^{-1}$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R$, 则 $(y, x) \in R^{-1}$, 由 $R^{-1} \subseteq R$ 知 $(y, x) \in R$, 从而 $(x, y) \in R^{-1}$ 。 \square

定理3.3

设 R 和 S 为集合 X 上的二元关系, $R \subseteq S$, 则 $R^{-1} \subseteq S^{-1}$ 。

3. 关系的运算

定理3.2

设 R 为集合 X 上的二元关系, 则 R 为对称的当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

证明.

只需证 $R^{-1} \subseteq R$ 当且仅当 $R = R^{-1}$ 。

如果 $R = R^{-1}$, 则显然 $R^{-1} \subseteq R$ 。

由 $R^{-1} \subseteq R$ 往证 $R = R^{-1}$, 此时只需证 $R \subseteq R^{-1}$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X$, 如果 $(x, y) \in R$, 则 $(y, x) \in R^{-1}$, 由 $R^{-1} \subseteq R$ 知 $(y, x) \in R$, 从而 $(x, y) \in R^{-1}$ 。 \square

定理3.3

设 R 和 S 为集合 X 上的二元关系, $R \subseteq S$, 则 $R^{-1} \subseteq S^{-1}$ 。

定理3.4

设 R 和 S 为集合 X 上的二元关系, 则 $(R^{-1})^{-1} = R$ 。

3. 关系的运算

定义3.2

设 R 为从集合 A 到集合 B ， S 为从集合 B 到集合 C 的二元关系。 R 与 S 的合成 $R \circ S$ 定义为从集合 A 到集合 C 的一个二元关系

$$R \circ S = \{(x, z) \in A \times C \mid \exists y \in B \text{ 使得 } xRy \text{ 且 } ySz\}$$

3. 关系的运算

定义3.2

设 R 为从集合 A 到集合 B , S 为从集合 B 到集合 C 的二元关系。 R 与 S 的合成 $R \circ S$ 定义为从集合 A 到集合 C 的一个二元关系

$$R \circ S = \{(x, z) \in A \times C \mid \exists y \in B \text{ 使得 } xRy \text{ 且 } ySz\}$$

例3.2

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$, 则 $R \circ R = ?$

3. 关系的运算

定义3.2

设 R 为从集合 A 到集合 B , S 为从集合 B 到集合 C 的二元关系。 R 与 S 的合成 $R \circ S$ 定义为从集合 A 到集合 C 的一个二元关系

$$R \circ S = \{(x, z) \in A \times C \mid \exists y \in B \text{ 使得 } xRy \text{ 且 } ySz\}$$

例3.2

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$, 则 $R \circ R = ?$

$$R \circ R = \{(1, 3), (2, 1), (3, 2)\}$$

3. 关系的运算

定义3.2

设 R 为从集合 A 到集合 B , S 为从集合 B 到集合 C 的二元关系。 R 与 S 的合成 $R \circ S$ 定义为从集合 A 到集合 C 的一个二元关系

$$R \circ S = \{(x, z) \in A \times C \mid \exists y \in B \text{ 使得 } xRy \text{ 且 } ySz\}$$

例3.2

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$, 则 $R \circ R = ?$

$$R \circ R = \{(1, 3), (2, 1), (3, 2)\}$$

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, R 的非负整数次幂递归的定义如下:

$$R^0 = I_X, R^1 = R, R^{n+1} = R^n \circ R$$

3. 关系的运算

定义3.2

设 R 为从集合 A 到集合 B , S 为从集合 B 到集合 C 的二元关系。 R 与 S 的合成 $R \circ S$ 定义为从集合 A 到集合 C 的一个二元关系

$$R \circ S = \{(x, z) \in A \times C \mid \exists y \in B \text{ 使得 } xRy \text{ 且 } ySz\}$$

例3.2

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$, 则 $R \circ R = ?$

$$R \circ R = \{(1, 3), (2, 1), (3, 2)\}$$

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, R 的非负整数次幂递归的定义如下:

$$R^0 = I_X, R^1 = R, R^{n+1} = R^n \circ R$$

在上例中, $R^0 = ?$, $R^3 = ?$

3. 关系的运算

定义3.2

设 R 为从集合 A 到集合 B , S 为从集合 B 到集合 C 的二元关系。 R 与 S 的合成 $R \circ S$ 定义为从集合 A 到集合 C 的一个二元关系

$$R \circ S = \{(x, z) \in A \times C \mid \exists y \in B \text{ 使得 } xRy \text{ 且 } ySz\}$$

例3.2

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$, 则 $R \circ R = ?$

$$R \circ R = \{(1, 3), (2, 1), (3, 2)\}$$

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, R 的非负整数次幂递归的定义如下:

$$R^0 = I_X, R^1 = R, R^{n+1} = R^n \circ R$$

在上例中, $R^0 = ?$, $R^3 = ?$

$$R^0 = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3)\},$$

3. 关系的运算

定义3.2

设 R 为从集合 A 到集合 B , S 为从集合 B 到集合 C 的二元关系。 R 与 S 的合成 $R \circ S$ 定义为从集合 A 到集合 C 的一个二元关系

$$R \circ S = \{(x, z) \in A \times C \mid \exists y \in B \text{ 使得 } xRy \text{ 且 } ySz\}$$

例3.2

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$, 则 $R \circ R = ?$

$$R \circ R = \{(1, 3), (2, 1), (3, 2)\}$$

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, R 的非负整数次幂递归的定义如下:

$$R^0 = I_X, R^1 = R, R^{n+1} = R^n \circ R$$

在上例中, $R^0 = ?$, $R^3 = ?$

$$R^0 = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3)\}, R^3 = R^2 \circ R = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3)\}。$$

定理3.5

设 R_1 , R_2 , R_3 分别为从集合 A 到集合 B , 从集合 B 到集合 C , 从集合 C 到集合 D 的二元关系, 则

$$(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$$

定理3.5

设 R_1 , R_2 , R_3 分别为从集合 A 到集合 B , 从集合 B 到集合 C , 从集合 C 到集合 D 的二元关系, 则

$$(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$$

证明.

定理3.5

设 R_1 , R_2 , R_3 分别为从集合 A 到集合 B , 从集合 B 到集合 C , 从集合 C 到集合 D 的二元关系, 则

$$(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$$

证明.

$$\forall a \in A \forall d \in D$$

定理3.5

设 R_1 , R_2 , R_3 分别为从集合 A 到集合 B , 从集合 B 到集合 C , 从集合 C 到集合 D 的二元关系, 则

$$(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$$

证明.

$$\forall a \in A \forall d \in D$$

$$(a, d) \in (R_1 \circ R_2) \circ R_3$$

定理3.5

设 R_1 , R_2 , R_3 分别为从集合 A 到集合 B , 从集合 B 到集合 C , 从集合 C 到集合 D 的二元关系, 则

$$(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$$

证明.

$$\forall a \in A \forall d \in D$$

$$(a, d) \in (R_1 \circ R_2) \circ R_3$$

$$\Leftrightarrow \exists c \in C ((a, c) \in R_1 \circ R_2 \wedge (c, d) \in R_3)$$

定理3.5

设 R_1 , R_2 , R_3 分别为从集合 A 到集合 B , 从集合 B 到集合 C , 从集合 C 到集合 D 的二元关系, 则

$$(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$$

证明.

$$\forall a \in A \forall d \in D$$

$$(a, d) \in (R_1 \circ R_2) \circ R_3$$

$$\Leftrightarrow \exists c \in C ((a, c) \in R_1 \circ R_2 \wedge (c, d) \in R_3)$$

$$\Leftrightarrow \exists c \in C (\exists b \in B ((a, b) \in R_1 \wedge (b, c) \in R_2) \wedge (c, d) \in R_3)$$

定理3.5

设 R_1 , R_2 , R_3 分别为从集合 A 到集合 B , 从集合 B 到集合 C , 从集合 C 到集合 D 的二元关系, 则

$$(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$$

证明.

$$\forall a \in A \forall d \in D$$

$$(a, d) \in (R_1 \circ R_2) \circ R_3$$

$$\Leftrightarrow \exists c \in C((a, c) \in R_1 \circ R_2 \wedge (c, d) \in R_3)$$

$$\Leftrightarrow \exists c \in C(\exists b \in B((a, b) \in R_1 \wedge (b, c) \in R_2) \wedge (c, d) \in R_3)$$

$$\Leftrightarrow \exists b \in B((a, b) \in R_1 \wedge \exists c \in C((b, c) \in R_2 \wedge (c, d) \in R_3))$$

定理3.5

设 R_1 , R_2 , R_3 分别为从集合 A 到集合 B , 从集合 B 到集合 C , 从集合 C 到集合 D 的二元关系, 则

$$(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$$

证明.

$$\forall a \in A \forall d \in D$$

$$(a, d) \in (R_1 \circ R_2) \circ R_3$$

$$\Leftrightarrow \exists c \in C((a, c) \in R_1 \circ R_2 \wedge (c, d) \in R_3)$$

$$\Leftrightarrow \exists c \in C(\exists b \in B((a, b) \in R_1 \wedge (b, c) \in R_2) \wedge (c, d) \in R_3)$$

$$\Leftrightarrow \exists b \in B((a, b) \in R_1 \wedge \exists c \in C((b, c) \in R_2 \wedge (c, d) \in R_3))$$

$$\Leftrightarrow \exists b \in B((a, b) \in R_1 \wedge (b, d) \in R_2 \circ R_3)$$

定理3.5

设 R_1 , R_2 , R_3 分别为从集合 A 到集合 B , 从集合 B 到集合 C , 从集合 C 到集合 D 的二元关系, 则

$$(R_1 \circ R_2) \circ R_3 = R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$$

证明.

$$\forall a \in A \forall d \in D$$

$$(a, d) \in (R_1 \circ R_2) \circ R_3$$

$$\Leftrightarrow \exists c \in C((a, c) \in R_1 \circ R_2 \wedge (c, d) \in R_3)$$

$$\Leftrightarrow \exists c \in C(\exists b \in B((a, b) \in R_1 \wedge (b, c) \in R_2) \wedge (c, d) \in R_3)$$

$$\Leftrightarrow \exists b \in B((a, b) \in R_1 \wedge \exists c \in C((b, c) \in R_2 \wedge (c, d) \in R_3))$$

$$\Leftrightarrow \exists b \in B((a, b) \in R_1 \wedge (b, d) \in R_2 \circ R_3)$$

$$\Leftrightarrow (a, d) \in R_1 \circ (R_2 \circ R_3)$$



定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

对任意的 $a \in X$, $c \in X$,

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

对任意的 $a \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, c) \in R \circ R$,

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

对任意的 $a \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, c) \in R \circ R$, 则存在 $b \in X$,

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

对任意的 $a \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, c) \in R \circ R$, 则存在 $b \in X$, $(a, b) \in R$ 并且 $(b, c) \in R$,

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

对任意的 $a \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, c) \in R \circ R$, 则存在 $b \in X$, $(a, b) \in R$ 并且 $(b, c) \in R$, 由 R 为传递的知 $(a, c) \in R$ 。

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

对任意的 $a \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, c) \in R \circ R$, 则存在 $b \in X$, $(a, b) \in R$ 并且 $(b, c) \in R$, 由 R 为传递的知 $(a, c) \in R$ 。

由 $R \circ R \subseteq R$ 往证 R 为传递的。

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

对任意的 $a \in X, c \in X$ ，如果 $(a, c) \in R \circ R$ ，则存在 $b \in X, (a, b) \in R$ 并且 $(b, c) \in R$ ，由 R 为传递的知 $(a, c) \in R$ 。

由 $R \circ R \subseteq R$ 往证 R 为传递的。

对任意的 $a \in X, b \in X, c \in X$,

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

对任意的 $a \in X, c \in X$ ，如果 $(a, c) \in R \circ R$ ，则存在 $b \in X, (a, b) \in R$ 并且 $(b, c) \in R$ ，由 R 为传递的知 $(a, c) \in R$ 。

由 $R \circ R \subseteq R$ 往证 R 为传递的。

对任意的 $a \in X, b \in X, c \in X$ ，如果 $(a, b) \in R$,

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

对任意的 $a \in X, c \in X$ ，如果 $(a, c) \in R \circ R$ ，则存在 $b \in X, (a, b) \in R$ 并且 $(b, c) \in R$ ，由 R 为传递的知 $(a, c) \in R$ 。

由 $R \circ R \subseteq R$ 往证 R 为传递的。

对任意的 $a \in X, b \in X, c \in X$ ，如果 $(a, b) \in R, (b, c) \in R$,

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

对任意的 $a \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, c) \in R \circ R$, 则存在 $b \in X$, $(a, b) \in R$ 并且 $(b, c) \in R$, 由 R 为传递的知 $(a, c) \in R$ 。

由 $R \circ R \subseteq R$ 往证 R 为传递的。

对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in R$, $(b, c) \in R$, 则 $(a, c) \in R \circ R$,

定理3.6

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则 R 为传递的当且仅当 $R \circ R \subseteq R$ 。

证明.

由 R 为传递的往证 $R \circ R \subseteq R$ 。

对任意的 $a \in X, c \in X$ ，如果 $(a, c) \in R \circ R$ ，则存在 $b \in X, (a, b) \in R$ 并且 $(b, c) \in R$ ，由 R 为传递的知 $(a, c) \in R$ 。

由 $R \circ R \subseteq R$ 往证 R 为传递的。

对任意的 $a \in X, b \in X, c \in X$ ，如果 $(a, b) \in R, (b, c) \in R$ ，则 $(a, c) \in R \circ R$ ，由 $R \circ R \subseteq R$ 知 $(a, c) \in R$ 。 □

4. 关系矩阵和关系图

定义4.1

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为一个包含 m 个元素的集合, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ 为一个包含 n 个元素的集合, R 为从 X 到 Y 的一个二元关系。由 R 定义一个 $m \times n$ 矩阵 $B = (b_{ij})$ 如下: $\forall (x_i, y_j) \in X \times Y$,

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } x_i R y_j \\ 0, & \text{如果 } x_i \not R y_j \end{cases}$$

则矩阵 B 称为关系 R 的矩阵。

4. 关系矩阵和关系图

例4.1

设 $X = \{1, 2\}$, $Y = \{3, 4, 5\}$, 从 X 到 Y 的关系 $R = \{(1, 3), (2, 5)\}$, 则关系 R 的矩阵为?

4. 关系矩阵和关系图

例4.1

设 $X = \{1, 2\}$, $Y = \{3, 4, 5\}$, 从 X 到 Y 的关系 $R = \{(1, 3), (2, 5)\}$, 则关系 R 的矩阵为?

4. 关系矩阵和关系图

例4.1

设 $X = \{1, 2\}$, $Y = \{3, 4, 5\}$, 从 X 到 Y 的关系 $R = \{(1, 3), (2, 5)\}$, 则关系 R 的矩阵为?

关系 R 的矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. 关系矩阵和关系图

定义4.2

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ 为一个包含 m 个元素的集合, R 为从 X 上的一个二元关系。由 R 定义一个 $m \times m$ 矩阵 $B = (b_{ij})$ 如下: $\forall (x_i, y_j) \in X \times X$,

$$b_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{如果 } x_i R y_j \\ 0, & \text{如果 } x_i \not R y_j \end{cases}$$

则矩阵 B 称为关系 R 的矩阵。

4. 关系矩阵和关系图

例4.2

设集合 $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 上的关系 R 定义如下:

$$R = \{(1, 1), (1, 3), (1, 5), (2, 2), (2, 4), (3, 1), (3, 3), (3, 5), (4, 2), (4, 4), (5, 1), (5, 3), (5, 5), (6, 6)\},$$

则关系 R 的矩阵为?

4. 关系矩阵和关系图

例4.2

设集合 $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 上的关系 R 定义如下:

$$R = \{(1, 1), (1, 3), (1, 5), (2, 2), (2, 4), (3, 1), (3, 3), (3, 5), (4, 2), (4, 4), (5, 1), (5, 3), (5, 5), (6, 6)\},$$

则关系 R 的矩阵为?

关系 R 的矩阵为

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. 关系矩阵和关系图

定理4.1

设 B 为集合 X 上二元关系 R 的矩阵, 则

- (1) R 为自反的, 当且仅当 B 的对角线上的全部元素都为1;
- (2) R 为反自反的, 当且仅当 B 的对角线上的全部元素都为0;
- (3) R 为对称的, 当且仅当 B 是对称矩阵;
- (4) R 为反对称的, 当且仅当 $i \neq j$ 时 b_{ij} 与 b_{ji} 不同时为1;
- (5) R 为传递的, 当且仅当如果 $b_{ij} = 1$ 且 $b_{jk} = 1$, 则 $b_{ik} = 1$ 。

4. 关系矩阵和关系图

定理4.2

设 B 为集合 X 上二元关系 R 的矩阵, 则 R^{-1} 的矩阵为 B^T 。

4. 关系矩阵和关系图

定义4.3

设 B, C 为两个布尔矩阵, B 与 C 的逻辑乘为 B 与 C 的对应元素进行逻辑乘, 所得到的布尔矩阵记为 $B \wedge C$, 即

$$B \wedge C = (b_{ij} \wedge c_{ij})$$

B 与 C 的逻辑加为 B 与 C 的对应元素进行逻辑加, 所得到的布尔矩阵记为 $B \vee C$, 即

$$B \vee C = (b_{ij} \vee c_{ij})$$

定理4.3

设 R, S 为从集合 X 到集合 Y 的二元关系, 其矩阵分别为 B_R 和 B_S 。 $R \cup S$ 与 $R \cap S$ 的矩阵分别为 $B_{R \cup S}$, $B_{R \cap S}$, 则

$$B_{R \cup S} = B_R \vee B_S, B_{R \cap S} = B_R \wedge B_S$$

4. 关系矩阵和关系图

定义4.4

设 A 为 $m \times p$ 布尔矩阵, B 为 $p \times n$ 布尔矩阵, A 与 B 的布尔乘积 $A \circ B$ 定义为矩阵 C , 其元素计算如下

$$c_{ij} = (a_{i1} \wedge b_{1j}) \vee (a_{i2} \wedge b_{2j}) \vee \cdots \vee (a_{ip} \wedge b_{pj}), \\ i = 1, 2, \cdots, m, j = 1, 2, \cdots, n$$

4. 关系矩阵和关系图

定义4.4

设 A 为 $m \times p$ 布尔矩阵, B 为 $p \times n$ 布尔矩阵, A 与 B 的布尔乘积 $A \circ B$ 定义为矩阵 C , 其元素计算如下

$$c_{ij} = (a_{i1} \wedge b_{1j}) \vee (a_{i2} \wedge b_{2j}) \vee \cdots \vee (a_{ip} \wedge b_{pj}), \\ i = 1, 2, \cdots, m, j = 1, 2, \cdots, n$$

设布尔矩阵

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4. 关系矩阵和关系图

定义4.4

设 A 为 $m \times p$ 布尔矩阵, B 为 $p \times n$ 布尔矩阵, A 与 B 的布尔乘积 $A \circ B$ 定义为矩阵 C , 其元素计算如下

$$c_{ij} = (a_{i1} \wedge b_{1j}) \vee (a_{i2} \wedge b_{2j}) \vee \cdots \vee (a_{ip} \wedge b_{pj}), \\ i = 1, 2, \cdots, m, j = 1, 2, \cdots, n$$

设布尔矩阵

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

则

$$B \circ B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

4. 关系矩阵和关系图

定义4.4

设 A 为 $m \times p$ 布尔矩阵, B 为 $p \times n$ 布尔矩阵, A 与 B 的布尔乘积 $A \circ B$ 定义为矩阵 C , 其元素计算如下

$$c_{ij} = (a_{i1} \wedge b_{1j}) \vee (a_{i2} \wedge b_{2j}) \vee \cdots \vee (a_{ip} \wedge b_{pj}), \\ i = 1, 2, \cdots, m, j = 1, 2, \cdots, n$$

设布尔矩阵

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

则

$$B \circ B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

定理4.4

设 X, Y, Z 为有穷集合, $|X| = m$, $|Y| = p$, $|Z| = n$ 。 R 为从 X 到 Y 的二元关系, S 为从 Y 到 Z 的二元关系, $R, S, R \circ S$ 的矩阵分别为 $B_R, B_S, B_{R \circ S}$, 则 $B_{R \circ S} = B_R \circ B_S$ 。

定理4.4

设 X, Y, Z 为有穷集合, $|X| = m$, $|Y| = p$, $|Z| = n$ 。 R 为从 X 到 Y 的二元关系, S 为从 Y 到 Z 的二元关系, $R, S, R \circ S$ 的矩阵分别为 $B_R, B_S, B_{R \circ S}$, 则 $B_{R \circ S} = B_R \circ B_S$ 。

设集合 $X = \{1, 2, 3\}$, $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$, 关系 R 的矩阵为

$$B_R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

定理4.4

设 X, Y, Z 为有穷集合, $|X| = m$, $|Y| = p$, $|Z| = n$ 。 R 为从 X 到 Y 的二元关系, S 为从 Y 到 Z 的二元关系, $R, S, R \circ S$ 的矩阵分别为 $B_R, B_S, B_{R \circ S}$, 则 $B_{R \circ S} = B_R \circ B_S$ 。

设集合 $X = \{1, 2, 3\}$, $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$, 关系 R 的矩阵为

$$B_R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

则关系 $R \circ R$ 的矩阵为

$$B_{R \circ R} = B_R \circ B_R = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

4. 关系矩阵和关系图

定理4.4

设 X, Y, Z 为有穷集合, $|X| = m$, $|Y| = p$, $|Z| = n$ 。 R 为从 X 到 Y 的二元关系, S 为从 Y 到 Z 的二元关系, $R, S, R \circ S$ 的矩阵分别为 $B_R, B_S, B_{R \circ S}$, 则 $B_{R \circ S} = B_R \circ B_S$ 。

4. 关系矩阵和关系图

定理4.4

设 X, Y, Z 为有穷集合, $|X| = m$, $|Y| = p$, $|Z| = n$ 。 R 为从 X 到 Y 的二元关系, S 为从 Y 到 Z 的二元关系, $R, S, R \circ S$ 的矩阵分别为 $B_R, B_S, B_{R \circ S}$, 则 $B_{R \circ S} = B_R \circ B_S$ 。

证明.

4. 关系矩阵和关系图

定理4.4

设 X, Y, Z 为有穷集合, $|X| = m$, $|Y| = p$, $|Z| = n$ 。 R 为从 X 到 Y 的二元关系, S 为从 Y 到 Z 的二元关系, $R, S, R \circ S$ 的矩阵分别为 $B_R, B_S, B_{R \circ S}$, 则 $B_{R \circ S} = B_R \circ B_S$ 。

证明.

设 $B_R = (a_{ij}), B_S = (b_{ij}), B_{R \circ S} = (c_{ij})$,

4. 关系矩阵和关系图

定理4.4

设 X, Y, Z 为有穷集合, $|X| = m$, $|Y| = p$, $|Z| = n$ 。 R 为从 X 到 Y 的二元关系, S 为从 Y 到 Z 的二元关系, $R, S, R \circ S$ 的矩阵分别为 $B_R, B_S, B_{R \circ S}$, 则 $B_{R \circ S} = B_R \circ B_S$ 。

证明.

设 $B_R = (a_{ij}), B_S = (b_{ij}), B_{R \circ S} = (c_{ij})$,
 $c_{ij} = 1$

4. 关系矩阵和关系图

定理4.4

设 X, Y, Z 为有穷集合, $|X| = m$, $|Y| = p$, $|Z| = n$ 。 R 为从 X 到 Y 的二元关系, S 为从 Y 到 Z 的二元关系, $R, S, R \circ S$ 的矩阵分别为 $B_R, B_S, B_{R \circ S}$, 则 $B_{R \circ S} = B_R \circ B_S$ 。

证明.

设 $B_R = (a_{ij}), B_S = (b_{ij}), B_{R \circ S} = (c_{ij})$,

$$c_{ij} = 1$$

$$\Leftrightarrow (x_i, z_j) \in R \circ S$$

4. 关系矩阵和关系图

定理4.4

设 X, Y, Z 为有穷集合, $|X| = m$, $|Y| = p$, $|Z| = n$ 。 R 为从 X 到 Y 的二元关系, S 为从 Y 到 Z 的二元关系, $R, S, R \circ S$ 的矩阵分别为 $B_R, B_S, B_{R \circ S}$, 则 $B_{R \circ S} = B_R \circ B_S$ 。

证明.

设 $B_R = (a_{ij}), B_S = (b_{ij}), B_{R \circ S} = (c_{ij})$,

$$c_{ij} = 1$$

$$\Leftrightarrow (x_i, z_j) \in R \circ S$$

$$\Leftrightarrow \exists y_k \in Y (x_i, y_k) \in R \wedge (y_k, z_j) \in S$$

4. 关系矩阵和关系图

定理4.4

设 X, Y, Z 为有穷集合, $|X| = m$, $|Y| = p$, $|Z| = n$ 。 R 为从 X 到 Y 的二元关系, S 为从 Y 到 Z 的二元关系, $R, S, R \circ S$ 的矩阵分别为 $B_R, B_S, B_{R \circ S}$, 则 $B_{R \circ S} = B_R \circ B_S$ 。

证明.

设 $B_R = (a_{ij}), B_S = (b_{ij}), B_{R \circ S} = (c_{ij})$,

$$c_{ij} = 1$$

$$\Leftrightarrow (x_i, z_j) \in R \circ S$$

$$\Leftrightarrow \exists y_k \in Y (x_i, y_k) \in R \wedge (y_k, z_j) \in S$$

$$\Leftrightarrow (a_{i1} = 1 \wedge b_{1j} = 1) \vee (a_{i2} = 1 \wedge b_{2j} = 1) \vee \cdots \vee (a_{ip} = 1 \wedge b_{pj} = 1)$$

4. 关系矩阵和关系图

定理4.4

设 X, Y, Z 为有穷集合, $|X| = m$, $|Y| = p$, $|Z| = n$ 。 R 为从 X 到 Y 的二元关系, S 为从 Y 到 Z 的二元关系, $R, S, R \circ S$ 的矩阵分别为 $B_R, B_S, B_{R \circ S}$, 则 $B_{R \circ S} = B_R \circ B_S$ 。

证明.

设 $B_R = (a_{ij}), B_S = (b_{ij}), B_{R \circ S} = (c_{ij})$,

$$c_{ij} = 1$$

$$\Leftrightarrow (x_i, z_j) \in R \circ S$$

$$\Leftrightarrow \exists y_k \in Y (x_i, y_k) \in R \wedge (y_k, z_j) \in S$$

$$\Leftrightarrow (a_{i1} = 1 \wedge b_{1j} = 1) \vee (a_{i2} = 1 \wedge b_{2j} = 1) \vee \cdots \vee (a_{ip} = 1 \wedge b_{pj} = 1)$$

$$\Leftrightarrow (a_{i1} \wedge b_{1j}) \vee (a_{i2} \wedge b_{2j}) \vee \cdots \vee (a_{ip} \wedge b_{pj}) = 1$$



4. 关系矩阵和关系图

定义4.5

关系除了用矩阵表示外，还可以用图来表示。设 X 和 Y 为有穷集合， R 为从 X 到 Y 的二元关系。当用图表示 R 时，先把 X 与 Y 的元素在纸上用点表示，并在其旁边标上这个元素的名字。然后把 R 的任一序对 (x, y) 用从代表 x 的点画一条指向代表 y 的点的矢线表示。这样就得到了一个由点、线组成的“有向图”，称为关系 R 的图。

4. 关系矩阵和关系图

例4.3

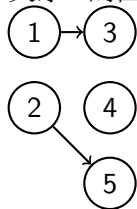
设 $X = \{1, 2\}$, $Y = \{3, 4, 5\}$, 从 X 到 Y 的关系 $R = \{(1, 3), (2, 5)\}$, 则关系 R 的图为?

4. 关系矩阵和关系图

例4.3

设 $X = \{1, 2\}$, $Y = \{3, 4, 5\}$, 从 X 到 Y 的关系 $R = \{(1, 3), (2, 5)\}$, 则关系 R 的图为?

关系 R 的图为



4. 关系矩阵和关系图

定义4.6

设 X 为有穷集合， R 为集合 X 上的二元关系。当用图表示 R 时，先把 X 的元素在纸上用点表示，并在其旁边标上这个元素的名字。然后把 R 的任一序对 (x, y) 用从代表 x 的点画一条指向代表 y 的点的矢线表示。这样就得到了一个由点、线组成的“有向图”，称为关系 R 的图。注意，如果 $(x, x) \in R$ ，则在代表 x 的点画一条又指向此点的矢线，称为环。

4. 关系矩阵和关系图

例4.4

设集合 $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 上的关系 R 定义如下:

$$R = \{(1, 1), (1, 3), (1, 5), (2, 2), (2, 4), (3, 1), (3, 3), (3, 5), (4, 2), (4, 4), (5, 1), (5, 3), (5, 5), (6, 6)\},$$

则关系 R 的图为?

4. 关系矩阵和关系图

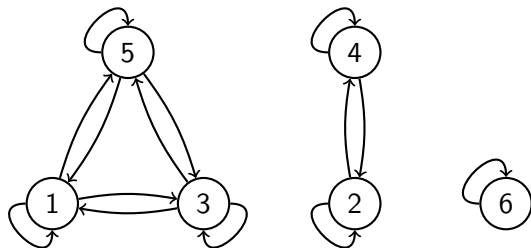
例4.4

设集合 $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 上的关系 R 定义如下:

$$R = \{(1, 1), (1, 3), (1, 5), (2, 2), (2, 4), (3, 1), (3, 3), (3, 5), (4, 2), (4, 4), (5, 1), (5, 3), (5, 5), (6, 6)\},$$

则关系 R 的图为?

关系 R 的图为



4. 关系矩阵和关系图

定理4.5

设 R 为集合 X 上的二元关系，则

- (1) R 为自反的，当且仅当 R 的图的每个顶点均有一个环；
- (2) R 为反自反的，当且仅当 R 的图中没有环；
- (3) R 为对称的，当且仅当 R 的图中任意两个不同顶点间有矢线，则必有两条方向相反的矢线；
- (4) R 为反对称的，当且仅当 R 的图中任意两个不同顶点间有矢线，则不能有两方向相反的矢线；
- (5) R 为传递的，当且仅当如果从某顶点沿矢线经两条矢线可到另一顶点，则从该顶点到另一顶点有一条矢线。

集合 X 上的二元关系 R 称为传递的，如果对 X 的任意元素 x, y, z ，只要 xRy 且 yRz ，就有 xRz 。

设集合 $X = \{1, 2, 3\}$ ， $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$ ，要使得 R 变成传递的二元关系，至少需要添加（ ）个有序对？

集合 X 上的二元关系 R 称为传递的，如果对 X 的任意元素 x, y, z ，只要 xRy 且 yRz ，就有 xRz 。

设集合 $X = \{1, 2, 3\}$ ， $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$ ，要使得 R 变成传递的二元关系，至少需要添加（ ）个有序对？

$$R^2 = \{(1, 3), (2, 1), (3, 2)\}$$

集合 X 上的二元关系 R 称为传递的，如果对 X 的任意元素 x, y, z ，只要 xRy 且 yRz ，就有 xRz 。

设集合 $X = \{1, 2, 3\}$ ， $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$ ，要使得 R 变成传递的二元关系，至少需要添加（ ）个有序对？

$$R^2 = \{(1, 3), (2, 1), (3, 2)\}$$

$$R^3 = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3)\}$$

集合 X 上的二元关系 R 称为传递的，如果对 X 的任意元素 x, y, z ，只要 xRy 且 yRz ，就有 xRz 。

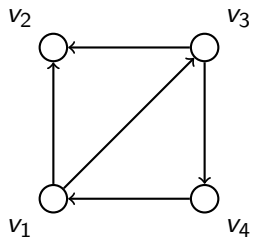
设集合 $X = \{1, 2, 3\}$ ， $R = \{(1, 2), (2, 3), (3, 1)\}$ ，要使得 R 变成传递的二元关系，至少需要添加（ ）个有序对？

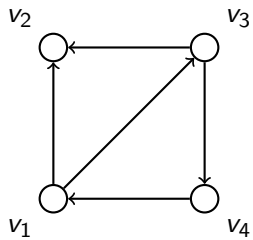
$$R^2 = \{(1, 3), (2, 1), (3, 2)\}$$

$$R^3 = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3)\}$$

$$R^4 = \dots$$

$(x, y) \in R^4$ 当且仅当存在 $x_1, x_2, x_3 \in X$ ， $(x, x_1) \in R$ ， $(x_1, x_2) \in R$ ， $(x_2, x_3) \in R$ ， $(x_3, y) \in R$





$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

5. 关系的闭包

定义5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系。 X 上的一切包含 R 的传递关系的交称为 R 的传递闭包，用 R^+ 表示。即

$$R^+ = \bigcap_{R \subseteq R' \text{ 且 } R' \text{ 是传递的}} R'$$

5. 关系的闭包

定理5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则关系 R 的传递闭包 R^+ 为包含 R 的传递关系。

5. 关系的闭包

定理5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则关系 R 的传递闭包 R^+ 为包含 R 的传递关系。

证明.

5. 关系的闭包

定理5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则关系 R 的传递闭包 R^+ 为包含 R 的传递关系。

证明.

由定义 $R^+ = \bigcap_{R \subseteq R' \text{ 且 } R' \text{ 是传递的}} R'$,

5. 关系的闭包

定理5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则关系 R 的传递闭包 R^+ 为包含 R 的传递关系。

证明.

由定义 $R^+ = \bigcap_{R \subseteq R' \text{ 且 } R' \text{ 是传递的}} R'$ ，显然 $R \subseteq R^+$ 。

5. 关系的闭包

定理5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则关系 R 的传递闭包 R^+ 为包含 R 的传递关系。

证明.

由定义 $R^+ = \bigcap_{R \subseteq R' \text{ 且 } R' \text{ 是传递的}} R'$ ，显然 $R \subseteq R^+$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X, z \in X$,

5. 关系的闭包

定理5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则关系 R 的传递闭包 R^+ 为包含 R 的传递关系。

证明.

由定义 $R^+ = \bigcap_{R \subseteq R' \text{ 且 } R' \text{ 是传递的}} R'$ ，显然 $R \subseteq R^+$ 。

对任意的 $x \in X$ ， $y \in X$ ， $z \in X$ ， $(x, y) \in R^+$ 并且 $(y, z) \in R^+$ ，

5. 关系的闭包

定理5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则关系 R 的传递闭包 R^+ 为包含 R 的传递关系。

证明.

由定义 $R^+ = \bigcap_{R \subseteq R' \text{ 且 } R' \text{ 是传递的}} R'$ ，显然 $R \subseteq R^+$ 。

对任意的 $x \in X$, $y \in X$, $z \in X$, $(x, y) \in R^+$ 并且 $(y, z) \in R^+$ ，则对任意的 R' , $R \subseteq R'$ 且 R' 是传递的，

5. 关系的闭包

定理5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则关系 R 的传递闭包 R^+ 为包含 R 的传递关系。

证明.

由定义 $R^+ = \bigcap_{R \subseteq R' \text{ 且 } R' \text{ 是传递的}} R'$ ，显然 $R \subseteq R^+$ 。

对任意的 $x \in X$ ， $y \in X$ ， $z \in X$ ， $(x, y) \in R^+$ 并且 $(y, z) \in R^+$ ，则对任意的 R' ， $R \subseteq R'$ 且 R' 是传递的， $(x, y) \in R'$ 并且 $(y, z) \in R'$ ，

5. 关系的闭包

定理5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则关系 R 的传递闭包 R^+ 为包含 R 的传递关系。

证明.

由定义 $R^+ = \bigcap_{R \subseteq R' \text{ 且 } R' \text{ 是传递的}} R'$ ，显然 $R \subseteq R^+$ 。

对任意的 $x \in X, y \in X, z \in X, (x, y) \in R^+$ 并且 $(y, z) \in R^+$ ，则对任意的 $R', R \subseteq R'$ 且 R' 是传递的， $(x, y) \in R'$ 并且 $(y, z) \in R'$ ，由 R' 为传递的知 $(x, z) \in R'$ ，

5. 关系的闭包

定理5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则关系 R 的传递闭包 R^+ 为包含 R 的传递关系。

证明.

由定义 $R^+ = \bigcap_{R \subseteq R' \text{ 且 } R' \text{ 是传递的}} R'$ ，显然 $R \subseteq R^+$ 。

对任意的 $x \in X$ ， $y \in X$ ， $z \in X$ ， $(x, y) \in R^+$ 并且 $(y, z) \in R^+$ ，则对任意的 R' ， $R \subseteq R'$ 且 R' 是传递的， $(x, y) \in R'$ 并且 $(y, z) \in R'$ ，由 R' 为传递的知 $(x, z) \in R'$ ，从而 $(x, z) \in R^+$ ，

5. 关系的闭包

定理5.1

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则关系 R 的传递闭包 R^+ 为包含 R 的传递关系。

证明.

由定义 $R^+ = \bigcap_{R \subseteq R' \text{ 且 } R' \text{ 是传递的}} R'$ ，显然 $R \subseteq R^+$ 。

对任意的 $x \in X$, $y \in X$, $z \in X$, $(x, y) \in R^+$ 并且 $(y, z) \in R^+$ ，则对任意的 R' , $R \subseteq R'$ 且 R' 是传递的, $(x, y) \in R'$ 并且 $(y, z) \in R'$ ，由 R' 为传递的知 $(x, z) \in R'$ ，从而 $(x, z) \in R^+$ ，这证明了 R^+ 为传递的。 \square

5. 关系的闭包

定理5.2

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $a \in X$, $b \in X$, $n \geq 2$,
则 $(a, b) \in R^n$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$, $x_2 \in X$, \dots , $x_{n-1} \in X$, 使得 $(a, x_1) \in R$, $(x_1, x_2) \in R$, \dots , $(x_{n-1}, b) \in R$ 。

证明.

5. 关系的闭包

定理5.2

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $a \in X$, $b \in X$, $n \geq 2$,
则 $(a, b) \in R^n$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$, $x_2 \in X$, \dots , $x_{n-1} \in X$, 使得 $(a, x_1) \in R$, $(x_1, x_2) \in R$, \dots , $(x_{n-1}, b) \in R$ 。

证明.

用数学归纳法证明, 施归纳于 n :

5. 关系的闭包

定理5.2

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $a \in X$, $b \in X$, $n \geq 2$, 则 $(a, b) \in R^n$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$, $x_2 \in X$, \dots , $x_{n-1} \in X$, 使得 $(a, x_1) \in R$, $(x_1, x_2) \in R$, \dots , $(x_{n-1}, b) \in R$ 。

证明.

用数学归纳法证明, 施归纳于 n :

当 $n = 2$ 时, 由关系合成运算的定义知 $(a, b) \in R^2$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$ 使得 $(a, x_1) \in R$ 且 $(x_1, b) \in R$, 结论成立。

5. 关系的闭包

定理5.2

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $a \in X$, $b \in X$, $n \geq 2$, 则 $(a, b) \in R^n$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$, $x_2 \in X$, \dots , $x_{n-1} \in X$, 使得 $(a, x_1) \in R$, $(x_1, x_2) \in R$, \dots , $(x_{n-1}, b) \in R$ 。

证明.

用数学归纳法证明, 施归纳于 n :

当 $n = 2$ 时, 由关系合成运算的定义知 $(a, b) \in R^2$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$ 使得 $(a, x_1) \in R$ 且 $(x_1, b) \in R$, 结论成立。

假设当 $n = k$ 时定理的结论成立, 往证当 $n = k + 1$ 时定理的结论也成立。

5. 关系的闭包

定理5.2

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $a \in X$, $b \in X$, $n \geq 2$, 则 $(a, b) \in R^n$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$, $x_2 \in X$, \dots , $x_{n-1} \in X$, 使得 $(a, x_1) \in R$, $(x_1, x_2) \in R$, \dots , $(x_{n-1}, b) \in R$ 。

证明.

用数学归纳法证明, 施归纳于 n :

当 $n = 2$ 时, 由关系合成运算的定义知 $(a, b) \in R^2$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$ 使得 $(a, x_1) \in R$ 且 $(x_1, b) \in R$, 结论成立。

假设当 $n = k$ 时定理的结论成立, 往证当 $n = k + 1$ 时定理的结论也成立。由关系合成运算的定义知 $(a, b) \in R^{k+1}$ 当且仅当存在 $x \in X$ 使得 $(a, x) \in R^k$ 且 $(x, b) \in R$ 。

5. 关系的闭包

定理5.2

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $a \in X$, $b \in X$, $n \geq 2$, 则 $(a, b) \in R^n$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$, $x_2 \in X$, \dots , $x_{n-1} \in X$, 使得 $(a, x_1) \in R$, $(x_1, x_2) \in R$, \dots , $(x_{n-1}, b) \in R$ 。

证明.

用数学归纳法证明, 施归纳于 n :

当 $n = 2$ 时, 由关系合成运算的定义知 $(a, b) \in R^2$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$ 使得 $(a, x_1) \in R$ 且 $(x_1, b) \in R$, 结论成立。

假设当 $n = k$ 时定理的结论成立, 往证当 $n = k + 1$ 时定理的结论也成立。由关系合成运算的定义知 $(a, b) \in R^{k+1}$ 当且仅当存在 $x \in X$ 使得 $(a, x) \in R^k$ 且 $(x, b) \in R$ 。由归纳假设, $(a, x) \in R^k$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$, $x_2 \in X$, \dots , $x_{k-1} \in X$, 使得 $(a, x_1) \in R$, $(x_1, x_2) \in R$, \dots , $(x_{k-1}, x) \in R$ 。

5. 关系的闭包

定理5.2

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $a \in X$, $b \in X$, $n \geq 2$, 则 $(a, b) \in R^n$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$, $x_2 \in X$, \dots , $x_{n-1} \in X$, 使得 $(a, x_1) \in R$, $(x_1, x_2) \in R$, \dots , $(x_{n-1}, b) \in R$ 。

证明.

用数学归纳法证明, 施归纳于 n :

当 $n = 2$ 时, 由关系合成运算的定义知 $(a, b) \in R^2$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$ 使得 $(a, x_1) \in R$ 且 $(x_1, b) \in R$, 结论成立。

假设当 $n = k$ 时定理的结论成立, 往证当 $n = k + 1$ 时定理的结论也成立。由关系合成运算的定义知 $(a, b) \in R^{k+1}$ 当且仅当存在 $x \in X$ 使得 $(a, x) \in R^k$ 且 $(x, b) \in R$ 。由归纳假设, $(a, x) \in R^k$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$, $x_2 \in X$, \dots , $x_{k-1} \in X$, 使得 $(a, x_1) \in R$, $(x_1, x_2) \in R$, \dots , $(x_{k-1}, x) \in R$ 。记 $x_k = x$, 则 $(a, b) \in R^{k+1}$ 当且仅当存在 $x_1 \in X$, $x_2 \in X$, \dots , $x_{k-1} \in X$, $x_k \in X$, 使得 $(a, x_1) \in R$, $(x_1, x_2) \in R$, \dots , $(x_{k-1}, x_k) \in R$, $(x_k, b) \in R$ 。 □

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$,

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$,

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$ ， $b \in X$ ， $c \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$ ， $b \in X$ ， $c \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$ ，

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$ ， $b \in X$ ， $c \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$ ，从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以,

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$ ， $b \in X$ ， $c \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$ ，从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以， $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$,

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$ ， $b \in X$ ， $c \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$ ，从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以， $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$ ， $b \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在某个正整数 m ,

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在某个正整数 m , 使得 $(a, b) \in R^m$ 。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在某个正整数 m , 使得 $(a, b) \in R^m$ 。如果 $m = 1$,

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在某个正整数 m , 使得 $(a, b) \in R^m$ 。如果 $m = 1$, 则 $(a, b) \in R \subseteq R^+$;

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在某个正整数 m , 使得 $(a, b) \in R^m$ 。如果 $m = 1$, 则 $(a, b) \in R \subseteq R^+$; 如果 $m > 1$,

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在某个正整数 m , 使得 $(a, b) \in R^m$ 。如果 $m = 1$, 则 $(a, b) \in R \subseteq R^+$; 如果 $m > 1$, 则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{m-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R$ 。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在某个正整数 m , 使得 $(a, b) \in R^m$ 。如果 $m = 1$, 则 $(a, b) \in R \subseteq R^+$; 如果 $m > 1$, 则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{m-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R$ 。由 $R \subseteq R^+$ 知 $(a, b_1) \in R^+$, $(b_1, b_2) \in R^+$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R^+$ 。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在某个正整数 m , 使得 $(a, b) \in R^m$ 。如果 $m = 1$, 则 $(a, b) \in R \subseteq R^+$; 如果 $m > 1$, 则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{m-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R$ 。由 $R \subseteq R^+$ 知 $(a, b_1) \in R^+$, $(b_1, b_2) \in R^+$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R^+$ 。又因为 R^+ 为传递的,

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在某个正整数 m , 使得 $(a, b) \in R^m$ 。如果 $m = 1$, 则 $(a, b) \in R \subseteq R^+$; 如果 $m > 1$, 则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{m-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R$ 。由 $R \subseteq R^+$ 知 $(a, b_1) \in R^+$, $(b_1, b_2) \in R^+$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R^+$ 。又因为 R^+ 为传递的, 所以 $(a, b) \in R^+$ 。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$, 从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以, $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, 如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$, 则存在某个正整数 m , 使得 $(a, b) \in R^m$ 。如果 $m = 1$, 则 $(a, b) \in R \subseteq R^+$; 如果 $m > 1$, 则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{m-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R$ 。由 $R \subseteq R^+$ 知 $(a, b_1) \in R^+$, $(b_1, b_2) \in R^+$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R^+$ 。又因为 R^+ 为传递的, 所以 $(a, b) \in R^+$ 。于是,

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$ ，从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以， $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，则存在某个正整数 m ，使得 $(a, b) \in R^m$ 。如果 $m = 1$ ，则 $(a, b) \in R \subseteq R^+$ ；如果 $m > 1$ ，则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{m-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R$ 。由 $R \subseteq R^+$ 知 $(a, b_1) \in R^+$, $(b_1, b_2) \in R^+$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R^+$ 。又因为 R^+ 为传递的，所以 $(a, b) \in R^+$ 。于是， $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$ ，从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以， $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，则存在某个正整数 m ，使得 $(a, b) \in R^m$ 。如果 $m = 1$ ，则 $(a, b) \in R \subseteq R^+$ ；如果 $m > 1$ ，则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{m-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R$ 。由 $R \subseteq R^+$ 知 $(a, b_1) \in R^+$, $(b_1, b_2) \in R^+$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R^+$ 。又因为 R^+ 为传递的，所以 $(a, b) \in R^+$ 。于是， $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。

因此，

5. 关系的闭包

定理5.3

设 R 为集合 X 上的一个二元关系，则

$$R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n = R \cup R^2 \cup R^3 \cup \dots$$

证明.

首先证明 $R^+ \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。

由 R^+ 的定义，只需证 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为包含 R 的传递关系即可。 $R \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是显然的。以下证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 为传递的。对任意的 $a \in X$, $b \in X$, $c \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 并且 $(b, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，则存在正整数 m 和 n 使得 $(a, b) \in R^m$ 且 $(b, c) \in R^n$ 。于是 $(a, c) \in R^m \circ R^n = R^{m+n}$ ，从而 $(a, c) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。所以， $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 是传递的。

其次证明 $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。对任意的 $a \in X$, $b \in X$ ，如果 $(a, b) \in \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ ，则存在某个正整数 m ，使得 $(a, b) \in R^m$ 。如果 $m = 1$ ，则 $(a, b) \in R \subseteq R^+$ ；如果 $m > 1$ ，则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{m-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R$ 。由 $R \subseteq R^+$ 知 $(a, b_1) \in R^+$, $(b_1, b_2) \in R^+$, \dots , $(b_{m-1}, b) \in R^+$ 。又因为 R^+ 为传递的，所以 $(a, b) \in R^+$ 。于是， $\bigcup_{n=1}^{\infty} R^n \subseteq R^+$ 。

因此， $R^+ = \bigcup_{n=1}^{\infty} R^n$ 。



5. 关系的闭包

定理5.4

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $|X| = n$, 则

$$R^+ = \bigcup_{i=1}^n R^i = R \cup R^2 \cup \dots \cup R^n$$

◦

5. 关系的闭包

定理5.4

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $|X| = n$, 则

$$R^+ = \bigcup_{i=1}^n R^i = R \cup R^2 \cup \dots \cup R^n$$

。

证明.

只需证明对任一自然数 $k > n$, 有 $R^k \subseteq \bigcup_{i=1}^n R^i$ 。

5. 关系的闭包

定理5.4

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $|X| = n$, 则

$$R^+ = \bigcup_{i=1}^n R^i = R \cup R^2 \cup \dots \cup R^n$$

。

证明.

只需证明对任一自然数 $k > n$, 有 $R^k \subseteq \bigcup_{i=1}^n R^i$ 。为此, 设 $(a, b) \in R^k$, 则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R, \dots, (b_{k-2}, b_{k-1}) \in R, (b_{k-1}, b) \in R$ 。记 $b_0 = a, b_k = b$ 。

5. 关系的闭包

定理5.4

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $|X| = n$, 则

$$R^+ = \bigcup_{i=1}^n R^i = R \cup R^2 \cup \dots \cup R^n$$

。

证明.

只需证明对任一自然数 $k > n$, 有 $R^k \subseteq \bigcup_{i=1}^n R^i$ 。为此, 设 $(a, b) \in R^k$, 则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R, \dots, (b_{k-2}, b_{k-1}) \in R, (b_{k-1}, b) \in R$ 。记 $b_0 = a, b_k = b$ 。 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1}, b$ 是 X 中的 k 个元素, 而 X 中仅有 n 个元素, $n < k$, 所以 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1}, b$ 中必有两个相等的元素。设 $b_i = b_j, 1 \leq i < j \leq k$ 。

5. 关系的闭包

定理5.4

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $|X| = n$, 则

$$R^+ = \bigcup_{i=1}^n R^i = R \cup R^2 \cup \dots \cup R^n$$

。

证明.

只需证明对任一自然数 $k > n$, 有 $R^k \subseteq \bigcup_{i=1}^n R^i$ 。为此, 设 $(a, b) \in R^k$, 则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R, \dots, (b_{k-2}, b_{k-1}) \in R, (b_{k-1}, b) \in R$ 。记 $b_0 = a, b_k = b$ 。 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1}, b$ 是 X 中的 k 个元素, 而 X 中仅有 n 个元素, $n < k$, 所以 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1}, b$ 中必有两个相等的元素。设 $b_i = b_j, 1 \leq i < j \leq k$ 。于是, 我们有 $(a, b_1) \in R, \dots, (b_{i-1}, b_i) \in R, (b_j, b_{j+1}) \in R, \dots, (b_{k-1}, b) \in R$, 故 $(a, b) \in R^{k-(j-i)}, p_1 = k - (j - i) < k$ 。

5. 关系的闭包

定理5.4

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $|X| = n$, 则

$$R^+ = \bigcup_{i=1}^n R^i = R \cup R^2 \cup \dots \cup R^n$$

。

证明.

只需证明对任一自然数 $k > n$, 有 $R^k \subseteq \bigcup_{i=1}^n R^i$ 。为此, 设 $(a, b) \in R^k$, 则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R, \dots, (b_{k-2}, b_{k-1}) \in R, (b_{k-1}, b) \in R$ 。记 $b_0 = a, b_k = b$ 。 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1}, b$ 是 X 中的 k 个元素, 而 X 中仅有 n 个元素, $n < k$, 所以 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1}, b$ 中必有两个相等的元素。设 $b_i = b_j, 1 \leq i < j \leq k$ 。于是, 我们有 $(a, b_1) \in R, \dots, (b_{i-1}, b_i) \in R, (b_j, b_{j+1}) \in R, \dots, (b_{k-1}, b) \in R$, 故 $(a, b) \in R^{k-(j-i)}, p_1 = k - (j - i) < k$ 。若 $p_1 = k - (j - i) > n$, 则重复上述过程又有 $p_2 < p_1$ 使得 $(a, b) \in R^{p_2}$ 。

5. 关系的闭包

定理5.4

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $|X| = n$, 则

$$R^+ = \bigcup_{i=1}^n R^i = R \cup R^2 \cup \dots \cup R^n$$

。

证明.

只需证明对任一自然数 $k > n$, 有 $R^k \subseteq \bigcup_{i=1}^n R^i$ 。为此, 设 $(a, b) \in R^k$, 则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R, \dots, (b_{k-2}, b_{k-1}) \in R, (b_{k-1}, b) \in R$ 。记 $b_0 = a, b_k = b$ 。 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1}, b$ 是 X 中的 k 个元素, 而 X 中仅有 n 个元素, $n < k$, 所以 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1}, b$ 中必有两个相等的元素。设 $b_i = b_j, 1 \leq i < j \leq k$ 。于是, 我们有 $(a, b_1) \in R, \dots, (b_{i-1}, b_i) \in R, (b_j, b_{j+1}) \in R, \dots, (b_{k-1}, b) \in R$, 故 $(a, b) \in R^{k-(j-i)}, p_1 = k - (j - i) < k$ 。若 $p_1 = k - (j - i) > n$, 则重复上述过程又有 $p_2 < p_1$ 使得 $(a, b) \in R^{p_2}$ 。如此进行下去, 必有 $m \leq n$ 使得 $(a, b) \in R^m$ 。所以, $R^k \subseteq \bigcup_{i=1}^n R^i$ 。

5. 关系的闭包

定理5.4

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $|X| = n$, 则

$$R^+ = \bigcup_{i=1}^n R^i = R \cup R^2 \cup \dots \cup R^n$$

。

证明.

只需证明对任一自然数 $k > n$, 有 $R^k \subseteq \bigcup_{i=1}^n R^i$ 。为此, 设 $(a, b) \in R^k$, 则存在 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1} \in X$ 使得 $(a, b_1) \in R$, $(b_1, b_2) \in R, \dots, (b_{k-2}, b_{k-1}) \in R, (b_{k-1}, b) \in R$ 。记 $b_0 = a, b_k = b$ 。 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1}, b$ 是 X 中的 k 个元素, 而 X 中仅有 n 个元素, $n < k$, 所以 $b_1, b_2, \dots, b_{k-1}, b$ 中必有两个相等的元素。设 $b_i = b_j, 1 \leq i < j \leq k$ 。于是, 我们有 $(a, b_1) \in R, \dots, (b_{i-1}, b_i) \in R, (b_j, b_{j+1}) \in R, \dots, (b_{k-1}, b) \in R$, 故 $(a, b) \in R^{k-(j-i)}, p_1 = k - (j - i) < k$ 。若 $p_1 = k - (j - i) > n$, 则重复上述过程又有 $p_2 < p_1$ 使得 $(a, b) \in R^{p_2}$ 。如此进行下去, 必有 $m \leq n$ 使得 $(a, b) \in R^m$ 。所以, $R^k \subseteq \bigcup_{i=1}^n R^i$ 。因此, $R^+ = \bigcup_{i=1}^n R^i$ 。

5. 关系的闭包

定理5.5

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $|X| = n$, B 为 R 的关系矩阵, B_{R^+} 为 R^+ 的关系矩阵, 简记为 B^+ , 则

$$B^+ = B \vee B^{(2)} \vee \dots \vee B^{(n)}$$

5. 关系的闭包

定理5.5

设 R 为集合 X 上的一个二元关系, $|X| = n$, B 为 R 的关系矩阵, B_{R^+} 为 R^+ 的关系矩阵, 简记为 B^+ , 则

$$B^+ = B \vee B^{(2)} \vee \dots \vee B^{(n)}$$

TRANSITIVE-CLOSURE(B)

// B is the zero-one $n \times n$ matrix for relation R

1 $M = B$

2 $A = M$

3 **for** $i = 2$ **to** n

4 $M = M \circ B$

5 $A = A \vee M$

6 **return** A // A is the zero-one matrix for R^+

5. 关系的闭包

WARSHALL(B)

// B is the zero-one $n \times n$ matrix for relation R

1 $A = B$

2 **for** $k = 1$ **to** n

3 **for** $i = 1$ **to** n

4 **for** $j = 1$ **to** n

5 $a_{ij} = a_{ij} \vee (a_{ik} \wedge a_{kj})$

6 **return** A // A is the zero-one matrix for R^+

5. 关系的闭包

WARSHALL(B)

// B is the zero-one $n \times n$ matrix for relation R

1 $A = B$

2 **for** $k = 1$ **to** n

3 **for** $i = 1$ **to** n

4 **for** $j = 1$ **to** n

5 $a_{ij} = a_{ij} \vee (a_{ik} \wedge a_{kj})$

6 **return** A // A is the zero-one matrix for R^+

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$$

5. 关系的闭包

WARSHALL(B)

// B is the zero-one $n \times n$ matrix for relation R

1 $A = B$

2 **for** $k = 1$ **to** n

3 **for** $i = 1$ **to** n

4 **for** $j = 1$ **to** n

5 $a_{ij} = a_{ij} \vee (a_{ik} \wedge a_{kj})$

6 **return** A // A is the zero-one matrix for R^+

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

$a_{ij}^{(0)} = a_{ij}$

5. 关系的闭包

WARSHALL(B)

// B is the zero-one $n \times n$ matrix for relation R

1 $A = B$

2 **for** $k = 1$ **to** n

3 **for** $i = 1$ **to** n

4 **for** $j = 1$ **to** n

5 $a_{ij} = a_{ij} \vee (a_{ik} \wedge a_{kj})$

6 **return** A // A is the zero-one matrix for R^+

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

$a_{ij}^{(0)} = a_{ij}$

$a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)} \vee (a_{ik}^{(k-1)} \wedge a_{kj}^{(k-1)})(k \geq 1)$

5. 关系的闭包

WARSHALL(B)

// B is the zero-one $n \times n$ matrix for relation R

1 $A = B$

2 **for** $k = 1$ **to** n

3 **for** $i = 1$ **to** n

4 **for** $j = 1$ **to** n

5 $a_{ij} = a_{ij} \vee (a_{ik} \wedge a_{kj})$

6 **return** A // A is the zero-one matrix for R^+

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$

$a_{ij}^{(0)} = a_{ij}$

$a_{ij}^{(k)} = a_{ij}^{(k-1)} \vee (a_{ik}^{(k-1)} \wedge a_{kj}^{(k-1)}) (k \geq 1)$

其中 $a_{ij}^{(k)} = 1$ 当且仅当存在 $x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_m} \in \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ 使得 $(x_i, x_{i_1}) \in R, (x_{i_1}, x_{i_2}) \in R, \dots, (x_{i_m}, x_j) \in R$ 。

5. 关系的闭包

WARSHALL(B)

// B is the zero-one $n \times n$ matrix for relation R

1 $A = B$

2 **for** $k = 1$ **to** n

3 **for** $i = 1$ **to** n

4 **for** $j = 1$ **to** n

5 $a_{ij} = a_{ij} \vee (a_{ik} \wedge a_{kj})$

6 **return** A // A is the zero-one matrix for R^+

5. 关系的闭包

WARSHALL(B)

// B is the zero-one $n \times n$ matrix for relation R

1 $A = B$

2 **for** $k = 1$ **to** n

3 **for** $i = 1$ **to** n

4 **for** $j = 1$ **to** n

5 $a_{ij} = a_{ij} \vee (a_{ik} \wedge a_{kj})$

6 **return** A // A is the zero-one matrix for R^+

$$a_{ik} = a_{ik} \vee (a_{ik} \wedge a_{kk})$$

5. 关系的闭包

WARSHALL(B)

// B is the zero-one $n \times n$ matrix for relation R

1 $A = B$

2 **for** $k = 1$ **to** n

3 **for** $i = 1$ **to** n

4 **for** $j = 1$ **to** n

5 $a_{ij} = a_{ij} \vee (a_{ik} \wedge a_{kj})$

6 **return** A // A is the zero-one matrix for R^+

$$a_{ik} = a_{ik} \vee (a_{ik} \wedge a_{kk})$$

$$a_{kj} = a_{kj} \vee (a_{kk} \wedge a_{kj})$$

5. 关系的闭包

WARSHALL(B)

// B is the zero-one $n \times n$ matrix for relation R

1 $A = B$

2 **for** $k = 1$ **to** n

3 **for** $i = 1$ **to** n

4 **if** $a_{ik} == 1$

5 **for** $j = 1$ **to** n

6 $a_{ij} = a_{ij} \vee a_{kj}$

7 **return** A // A is the zero-one matrix for R^+

6. 等价关系与集合的划分

定义6.1

集合 X 上的二元关系 R 称为**等价关系**，如果 R 同时满足以下三个性质：

- (1) R 是自反的，即对 X 中的任意元素 x ， xRx ；
- (2) R 是对称的，即对 X 中的任意元素 x, y ，如果 xRy ，则 yRx ；
- (3) R 是传递的，即对 X 中的任意元素 x, y, z ，如果 xRy 且 yRz ，则 xRz 。

6. 等价关系与集合的划分

例6.1

整数集 \mathbb{Z} 上的模 n 同余关系是 \mathbb{Z} 上的等价关系。

6. 等价关系与集合的划分

例6.1

整数集 \mathbb{Z} 上的模 n 同余关系是 \mathbb{Z} 上的等价关系。

证明.

只需验证整数集 \mathbb{Z} 上的模 n 同余关系满足自反性, 对称性和传递性。

(1) 自反性成立, 这是因为对任意的 $m \in \mathbb{Z}$, $m \equiv m \pmod{n}$ 。(注: 我们用 $m \equiv k \pmod{n}$ 表示 m 与 k 模 n 同余, 即 $n|(m-k)$)

(2) 对称性成立, 这是因为对任意的 $m \in \mathbb{Z}$, $k \in \mathbb{Z}$, 如果 $m \equiv k \pmod{n}$, 则 $n|(m-k)$, 于是 $n|(k-m)$, 即 $k \equiv m \pmod{n}$ 。

(3) 传递性成立, 这是因为对任意的 $m \in \mathbb{Z}$, $k \in \mathbb{Z}$, $l \in \mathbb{Z}$, 如果 $m \equiv k \pmod{n}$ 并且 $k \equiv l \pmod{n}$, 则 $n|(m-k)$ 并且 $n|(k-l)$, 从而 $n|((m-k) + (k-l))$, 即 $n|(m-l)$, 因此 $m \equiv l \pmod{n}$ 。 □

6. 等价关系与集合的划分

例6.2

设集合 $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 上的关系 R 定义如下:

$$R = \{(1, 1), (1, 3), (1, 5), (2, 2), (2, 4), (3, 1), (3, 3), (3, 5), (4, 2), (4, 4), (5, 1), (5, 3), (5, 5), (6, 6)\},$$

则 R 为 X 上的等价关系。

6. 等价关系与集合的划分

定义6.2

设 \cong 为集合 X 上的一个等价关系, $x \in X$, X 的子集

$$E_x = \{y \in X | x \cong y\}$$

称为 x 关于 \cong 的**等价类**, 记为 $[x]$, 即

$$[x] = \{y \in X | x \cong y\}$$

定义6.3

设 \cong 为 X 上的等价关系, \cong 的所有等价类之集称为 X 对 \cong 的商集, 记为 X/\cong 。即

$$X/\cong = \{[x] | x \in X, [x] \text{ 为 } x \text{ 关于 } \cong \text{ 的等价类}\}$$

6. 等价关系与集合的划分

习题

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $Y = \{1, 2\}$, $S = \{f | f : X \rightarrow Y\}$ 。 S 上的二元关系 \cong 定义如下: $\forall f, g \in S$, $f \cong g$ 当且仅当

$$I_m(f) = I_m(g)$$

证明 \cong 是 S 上的等价关系, 并求出等价类之集。

6. 等价关系与集合的划分

习题

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $Y = \{1, 2\}$, $S = \{f | f : X \rightarrow Y\}$ 。 S 上的二元关系 \cong 定义如下: $\forall f, g \in S$, $f \cong g$ 当且仅当

$$I_m(f) = I_m(g)$$

证明 \cong 是 S 上的等价关系, 并求出等价类之集。

解.

首先验证 \cong 为 S 上的等价关系:

6. 等价关系与集合的划分

习题

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $Y = \{1, 2\}$, $S = \{f | f : X \rightarrow Y\}$ 。 S 上的二元关系 \cong 定义如下: $\forall f, g \in S$, $f \cong g$ 当且仅当

$$I_m(f) = I_m(g)$$

证明 \cong 是 S 上的等价关系, 并求出等价类之集。

解.

首先验证 \cong 为 S 上的等价关系:

\cong 为自反的, 这是因为对任意的映射 $f : X \rightarrow Y$, $I_m(f) = I_m(f)$;

6. 等价关系与集合的划分

习题

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $Y = \{1, 2\}$, $S = \{f | f : X \rightarrow Y\}$ 。 S 上的二元关系 \cong 定义如下: $\forall f, g \in S$, $f \cong g$ 当且仅当

$$I_m(f) = I_m(g)$$

证明 \cong 是 S 上的等价关系, 并求出等价类之集。

解.

首先验证 \cong 为 S 上的等价关系:

\cong 为自反的, 这是因为对任意的映射 $f : X \rightarrow Y$, $I_m(f) = I_m(f)$;

\cong 为对称的, 这是因为对任意的映射 $f : X \rightarrow Y$, $g : X \rightarrow Y$, 如果 $I_m(f) = I_m(g)$, 则 $I_m(g) = I_m(f)$;

6. 等价关系与集合的划分

习题

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $Y = \{1, 2\}$, $S = \{f | f : X \rightarrow Y\}$ 。 S 上的二元关系 \cong 定义如下: $\forall f, g \in S$, $f \cong g$ 当且仅当

$$I_m(f) = I_m(g)$$

证明 \cong 是 S 上的等价关系, 并求出等价类之集。

解.

首先验证 \cong 为 S 上的等价关系:

\cong 为自反的, 这是因为对任意的映射 $f : X \rightarrow Y$, $I_m(f) = I_m(f)$;

\cong 为对称的, 这是因为对任意的映射 $f : X \rightarrow Y$, $g : X \rightarrow Y$, 如果 $I_m(f) = I_m(g)$, 则 $I_m(g) = I_m(f)$;

\cong 为传递的, 这是因为对任意的映射 $f : X \rightarrow Y$, $g : X \rightarrow Y$, $h : X \rightarrow Y$, 如果 $I_m(f) = I_m(g)$ 并且 $I_m(g) = I_m(h)$, 则 $I_m(f) = I_m(h)$

□

6. 等价关系与集合的划分

解(续).

$S = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7, f_8\}$, 其中

$$f_1 : X \rightarrow Y, f_1(1) = 1, f_1(2) = 1, f_1(3) = 1, \text{Im}(f_1) = \{1\}$$

$$f_2 : X \rightarrow Y, f_2(1) = 1, f_2(2) = 1, f_2(3) = 2, \text{Im}(f_2) = \{1, 2\}$$

$$f_3 : X \rightarrow Y, f_3(1) = 1, f_3(2) = 2, f_3(3) = 1, \text{Im}(f_3) = \{1, 2\}$$

$$f_4 : X \rightarrow Y, f_4(1) = 1, f_4(2) = 2, f_4(3) = 2, \text{Im}(f_4) = \{1, 2\}$$

$$f_5 : X \rightarrow Y, f_5(1) = 2, f_5(2) = 1, f_5(3) = 1, \text{Im}(f_5) = \{1, 2\}$$

$$f_6 : X \rightarrow Y, f_6(1) = 2, f_6(2) = 1, f_6(3) = 2, \text{Im}(f_6) = \{1, 2\}$$

$$f_7 : X \rightarrow Y, f_7(1) = 2, f_7(2) = 2, f_7(3) = 1, \text{Im}(f_7) = \{1, 2\}$$

$$f_8 : X \rightarrow Y, f_8(1) = 2, f_8(2) = 2, f_8(3) = 2, \text{Im}(f_8) = \{2\}$$

则 $S/\cong = \{\{f_1\}, \{f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7\}, \{f_8\}\}$

□

6. 等价关系与集合的划分

定理6.1

设 \cong 为集合 X 上的一个等价关系，对任意的 $x \in X$ ， $y \in X$ ， $x \cong y$ 当且仅当 $[x] = [y]$ 。

6. 等价关系与集合的划分

定义6.4

设 X 为集合, X 的一些非空子集形成的集族 \mathcal{A} 称为 X 的一个划分, 如果 \mathcal{A} 具有性质

1. $\forall A, B \in \mathcal{A}$, 如果 $A \neq B$, 则 $A \cap B = \emptyset$;
2. $\bigcup_{A \in \mathcal{A}} A = X$

6. 等价关系与集合的划分

定理6.2

设 \cong 为集合 X 上的一个等价关系，则 \cong 的所有等价类的集合构成 X 的一个划分。

6. 等价关系与集合的划分

定理6.2

设 \cong 为集合 X 上的一个等价关系，则 \cong 的所有等价类的集合构成 X 的一个划分。

定理6.3

设 \mathcal{A} 为集合 X 的一个划分。令

$$\cong = \bigcup_{A \in \mathcal{A}} A \times A$$

则 \cong 是 X 上的一个等价关系且 \mathcal{A} 就是 \cong 的等价类之集。

6. 等价关系与集合的划分

定理6.4

设 X 为一个集合,

$$\mathbb{R} = \{\cong \subseteq X \times X \mid \cong \text{ 为集合 } X \text{ 上的一个等价关系}\},$$

$$\mathbb{A} = \{\mathcal{A} \subseteq 2^X \mid \mathcal{A} \text{ 为集合 } X \text{ 的一个划分}\},$$

$$f = \{(\cong, \{[x]_{\cong} \mid x \in X\}) \mid \cong \in \mathbb{R}, [x]_{\cong} = \{y \in X \mid x \cong y\}\}$$

$$g = \{(\mathcal{A}, \bigcup_{A \in \mathcal{A}} A \times A) \mid \mathcal{A} \in \mathbb{A}\}$$

则 f 为从 \mathbb{R} 到 \mathbb{A} 的双射, 且 $f^{-1} = g$ 。

6. 等价关系与集合的划分

证明.

1. 证明 f 为映射。这就是要证明对于集合 X 上的任意一个等价关系 \cong , $\{[x]_{\cong} | x \in X\}$ 为集合 X 的一个划分。
2. 证明 g 为映射。这就是要证明对于集合 X 的任意一个划分 \mathcal{A} , $\bigcup_{A \in \mathcal{A}} A \times A$ 为集合 X 上的一个等价关系。
3. 证明 $g \circ f = I_{\mathbb{R}}$ 。这就是要证明对于集合 X 上的任意一个等价关系 \cong , $\bigcup_{x \in X} [x]_{\cong} \times [x]_{\cong} = \cong$ 。
4. 证明 $f \circ g = I_{\mathbb{A}}$ 。这就是要证明对于集合 X 上的任意一个划分 \mathcal{A} , 等价关系 $\bigcup_{A \in \mathcal{A}} A \times A$ 所对应的等价类的集合就是 \mathcal{A} 。

□

6. 等价关系与集合的划分

习题

设集合 $X = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, \cong 为集合 X 的等价关系, $X/\cong = \{\{1, 2\}, \{3, 5\}, \{4, 6\}\}$, 试求 \cong 。

设 $x, y, z \in \mathbb{R}$, 则

1. $x + y = y + x$
2. $(x + y) + z = x + (y + z)$
3. $0 + x = x + 0 = x$
4. $(-x) + x = x + (-x) = 0$
5. $x * y = y * x$
6. $(x * y) * z = x * (y * z)$
7. $1 * x = x * 1 = x$
8. $x^{-1} * x = x * x^{-1} = 1$
9. $x * (y + z) = x * y + x * z$
10. $(y + z) * x = y * x + z * x$

1. 对任意的 $x \in R$, $y \in R$, $x < y, x = y, y < x$ 中有且仅有一个成立。
2. 对任意的 $x \in R$, $y \in R$, $z \in R$, 如果 $x < y$ 并且 $y < z$, 则 $x < z$ 。
3. 对任意的 $x \in R$, $y \in R$, $z \in R$, 如果 $x < y$, 则 $x + z < y + z$ 。
4. 对任意的 $x \in R$, $y \in R$, 如果 $x > 0$, $y > 0$, 则 $xy > 0$ 。

另外, 实数集还具有如下性质:

设 $A_1, A_2, \dots, A_i, \dots$ 为实数集 R 上的闭区间, $A_1 \supseteq A_2 \supseteq A_3 \supseteq \dots \supseteq A_i \supseteq \dots$, 则 $\bigcap_{i=1}^{\infty} A_i$ 非空。

7. 偏序关系与偏序集

定义7.1

集合 X 上的二元关系 R 称为**偏序关系**，如果 R 同时满足以下三个性质：

- (1) R 是自反的，即对 X 中的任意元素 x ， xRx ；
- (2) R 是反对称的，即对 X 中的任意元素 x, y ，如果 xRy 且 yRx ，则 $x = y$ ；
- (3) R 是传递的，即对 X 中的任意元素 x, y, z ，如果 xRy 且 yRz ，则 xRz 。

7. 偏序关系与偏序集

定义7.1

集合 X 上的二元关系 R 称为**偏序关系**，如果 R 同时满足以下三个性质：

- (1) R 是自反的，即对 X 中的任意元素 x ， xRx ；
- (2) R 是反对称的，即对 X 中的任意元素 x, y ，如果 xRy 且 yRx ，则 $x = y$ ；
- (3) R 是传递的，即对 X 中的任意元素 x, y, z ，如果 xRy 且 yRz ，则 xRz 。

定义7.2

设 \leq 为集合 X 上的一个偏序关系，则称二元组 (X, \leq) 为**偏序集**。

7. 偏序关系与偏序集

例7.1

实数集 \mathbb{R} 上通常的“小于等于”关系 \leq 是偏序关系，所以 (\mathbb{R}, \leq) 为偏序集。

例7.2

设 S 为一个集合， S 的子集间的包含关系 \subseteq 是 2^S 上的偏序关系，所以 $(2^S, \subseteq)$ 为偏序集。

7. 偏序关系与偏序集

例7.3

设集合 $X = \{a, b, c, d\}$ 上的关系 R 定义如下:

$$R = \{(a, a), (a, b), (a, c), (a, d), (b, b), (b, d), (c, c), (c, d), (d, d)\}$$

则 R 为 X 上的偏序关系。

7. 偏序关系与偏序集

定义7.3

设 \leq 为集合 X 上的偏序关系，如果 $\forall x, y \in X$ ， $x \leq y$ 与 $y \leq x$ 至少有一个成立，则称 \leq 为 X 上的**全序关系**。相应的，二元组 (X, \leq) 称为**全序集**。

7. 偏序关系与偏序集

定义7.4

设 (X, \leq) 为一个偏序集, $A \subseteq X$ 。如果存在一个元素 $s \in A$ 使得 $\forall x \in A$ 有 $x \leq s$, 则称 s 为 A 的**最大元素**; 如果存在一个元素 $t \in A$ 使得 $\forall x \in A$ 有 $t \leq x$, 则称 t 为 A 的**最小元素**。

定义7.5

设 (X, \leq) 为一个偏序集, $A \subseteq X$ 。如果存在一个元素 $s \in A$, 在 A 中没有元素 x 使得 $s < x$, 则称 s 为 A 的**极大元素**; 如果存在一个元素 $t \in A$, 在 A 中没有元素 x 使得 $x < t$, 则称 t 为 A 的**极小元素**。

7. 偏序关系与偏序集

定义7.6

设 (X, \leq) 为一个偏序集, $A \subseteq X$ 。如果存在一个元素 $s \in X$ 使得 $\forall x \in A$ 有 $x \leq s$, 则称 s 为 A 的一个上界; 如果存在一个元素 $t \in X$ 使得 $\forall x \in A$ 有 $t \leq x$, 则称 t 为 A 的一个下界。

定义7.7

设 (X, \leq) 为一个偏序集, $A \subseteq X$ 。如果 A 有上界且 A 的一切上界之集有最小元素, 则这个最小上界称为 A 的上确界, 记为 $\sup A$; 如果 A 有下界且 A 的一切下界之集有最大元素, 则这个最大下界称为 A 的下确界, 记为 $\inf A$ 。

7. 偏序关系与偏序集

定义7.8

设 (X, \leq) 为一个偏序集, $A \subseteq X$ 。如果对任意的 $a, b \in A$, $a \leq b$ 与 $b \leq a$ 必有一个成立, 则称 A 为 X 中的链; 如果对 A 中任两个不同的元素 a 与 b , $a \leq b$ 与 $b \leq a$ 均不成立, 则称 A 为 X 中的反链。 $|A|$ 称为链 (反链) 的长度。

7. 偏序关系与偏序集

定理7.1

设 (X, \leq) 为一个偏序集，如果 X 中所有链长度的最大值为 n ，则 X 的全部元素可以被分成 n 个非空不相交反链的并集。

7. 偏序关系与偏序集

定理7.1

设 (X, \leq) 为一个偏序集，如果 X 中所有链长度的最大值为 n ，则 X 的全部元素可以被分成 n 个非空不相交反链的并集。

推论7.1

设 (X, \leq) 为一个偏序集， $|X| = mn + 1$ ，则 X 中或存在一个长至少为 $n + 1$ 的链，或存在一个长至少为 $m + 1$ 的反链。

7. 偏序关系与偏序集

定理7.1

设 (X, \leq) 为一个偏序集, 如果 X 中所有链长度的最大值为 n , 则 X 的全部元素可以被分成 n 个非空不相交反链的并集。

推论7.1

设 (X, \leq) 为一个偏序集, $|X| = mn + 1$, 则 X 中或存在一个长至少为 $n + 1$ 的链, 或存在一个长至少为 $m + 1$ 的反链。

例7.4

证明: 每个由 $n^2 + 1$ 个实数组成的序列 $a_1, a_2, \dots, a_{n^2+1}$ 中必有长至少为 $n + 1$ 的不减子序列, 或有一个长至少为 $n + 1$ 的不增子序列。

习题

习题

是否存在一个同时不满足自反性、对称性、反对称性、传递性和反自反性的二元关系？

习题

实数集上的“小于”关系 $<$ 是否是反自反的？集合 X 的幂集 2^X 上的“真包含”关系 \subset 是否是反自反的？为什么？

习题

下列说法是否正确？若正确，请给出证明；若不正确，请说明理由。

- 1) 设 R 为集合 X 上的反自反的和传递的二元关系，则 R 为反对称的二元关系。
- 2) 设 R 为集合 X 上的对称的和传递的二元关系，则 R 为自反的二元关系。

习题

习题

设 $X = \{1, 2, 3\}$, $Y = \{1, 2\}$, $S = \{f | f : X \rightarrow Y\}$ 。 S 上的二元关系 \cong 定义如下: $\forall f, g \in S$, $f \cong g$ 当且仅当

$$I_m(f) = I_m(g)$$

证明 \cong 是 S 上的等价关系, 并求出等价类之集。

习题

设 X, Y, S 同习题4。 S 上的二元关系 \cong 定义如下: $\forall f, g \in S$, $f \cong g$ 当且仅当

$$f(1) + f(2) + f(3) = g(1) + g(2) + g(3)$$

证明 \cong 是 S 上的等价关系, 并求出等价类之集。

习题

习题

设 X, Y, S 同习题4。 S 上的二元关系 \cong 定义如下： $\forall f, g \in S, f \cong g$ 当且仅当

$$\{f^{-1}(\{y\}) | y \in Y\} = \{g^{-1}(\{y\}) | y \in Y\}$$

证明 \cong 是 S 上的等价关系，并求出等价类之集。

习题

是否存在一个偏序关系 \leq ，使 (X, \leq) 中有唯一极大元素，但没有最大元素？如果有，请给出一个具体例子；如果没有，请证明之。

习题

令 $X = \{a, b, c, d\}$ ，画出偏序集 $(2^X, \subseteq)$ 的Hasse图。

习题

习题

令 $S = \{1, 2, \dots, 12\}$, 画出偏序集 $(S, |)$ 的 *Hasse* 图, 其中 $|$ 为整除关系。它有几个极大 (小) 元素? 列出这些极大 (小) 元素。

习题

偏序集 (X, \leq) 称为有序完备的, 当且仅当 X 的每个有上界的非空子集有上确界。证明: 偏序集 (X, \leq) 为有序完备的当且仅当对 X 的每个有下界的非空子集有下确界。