

基于不协调置信优势原理关系的知识约简

苟光磊^{1,2,3} 王国胤²

(西南交通大学信息科学与技术学院 成都 610031)¹ (中国科学院重庆绿色智能技术研究院 重庆 401122)²
(重庆理工大学计算机科学与工程学院 重庆 400054)³

摘要 置信优势关系粗糙集用于处理不完备有序决策系统,知识约简是核心问题之一。在不完备有序决策系统下区分两个对象需考虑决策值之间的偏好关系,因此给出置信优势原理关系的定义,将满足此关系的对象视为是不可区分的。提出不协调优势原理关系下的约简定义,进一步给出约简的判定定理和辨识矩阵,从而提供了在不完备有序决策系统下新的知识约简方法。通过实例验证了新的知识约简方法的有效性。

关键词 不完备有序决策系统,知识约简,置信优势关系,不协调置信优势原理关系

中图分类号 TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.6.041

Approach to Knowledge Reduction Based on Inconsistent Confidential Dominance Principle Relation

GOU Guang-lei^{1,2,3} WANG Guo-yin²

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)¹

(Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 401122, China)²

(School of Computer Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)³

Abstract Confidential dominance relation based rough set model is used to deal with incomplete ordered decision system, in which knowledge reduction is one of the most important problems. In order to discern two objects in IODS, their decision preference should be taken into account. This paper proposed a knowledge reduction approach based on inconsistent confidential dominance principle relation, with which two objects are discernable. Furthermore, the judgment theorems and the discernable matrix are investigated, from which we can obtain a new approach to knowledge reduction in ordered decision system. An example illuminates effectiveness of the new reduction.

Keywords IODS, Knowledge reduction, Confidential dominance relation, Inconsistent confidential dominance principle relation

1 引言

决策分析中,优势关系粗糙集模型(Dominance-based Rough Set Approach, DRSA)^[1,2]常被用于处理有序决策系统(Ordered Decision System, ODS)的决策问题。与经典粗糙集^[3]基于等价关系(自反性、传递性、对称性)对论域进行划分不同,DRSA基于优势关系(自反性、传递性),将条件属性及决策属性视为具有偏好有序关系。现实生活中,由于数据采集技术的限制、传输故障及一些人为因素等原因造成数据缺损和丢失,不完备有序决策受到人们的关注。与多种基于拓展优势关系粗糙集模型类似,置信优势关系粗糙集^[4]被提出以用于处理不完备有序决策系统(Incomplete Ordered Decision System, IODS)。

知识约简是粗糙集理论及其扩展模型的核心问题之一^[5,6]。在完备有序决策系统下,徐伟华等提出了多种基于优势关系粗糙集的约简方法,包括分布约简和最大分布约

简^[7]、可能分布约简(分配约简)及相容分布约简^[8]。Inuiguchi等提出了多种保持某种结构不变的约简方法,包括基于联合类的上、下近似和边界域不变的约简方法^[9]。Kusunoki进一步给出基于类的上、下近似和边界域不变的约简方法^[10]。Susmaga给出了经典粗糙集和优势关系粗糙集的约简的统一框架和构造方法^[11]。Du等给出了有序区间值决策表中的近似分布约简方法^[12]。

对于不完备有序决策系统,上述约简方法不再适用,一些学者在这方面做出了尝试。Shao等提出扩展优势关系粗糙集模型,并给出了不协调不完备有序决策系统下的约简方法^[13]。Yang等提出相似优势关系粗糙集模型,并给出了不完备有序决策系统下保持上、下近似分布约简方法^[14]。Yang等将优势关系粗糙集用于不完备区间值信息系统,并给出了多种相对约简方法^[15]。

针对不完备有序决策系统,本文将给出置信优势关系下的约简方法。在有序决策系统下,决策属性值之间具有偏好

到稿日期:2015-05-18 返修日期:2015-10-03 本文受国家自然科学基金(61073146,61272060,61173184),重庆理工大学青年科研项目星火计划(2015XH15)资助。

苟光磊(1980—),男,博士生,讲师,主要研究方向为粗糙集、粒计算,E-mail:ggl@cqut.edu.cn;王国胤(1970—),男,博士,教授,主要研究方向为智能信息处理、粗糙集等。

有序关系,若直接将其视为“类”或者“联合类”,则忽略了有序的重要特性。对于置信优势关系,在多条件属性下是偏序关系,不是所有对象都可比较;而在单一决策属性下是全序关系,对象之间是可比较的。因此,本文认为在不考虑决策属性偏好的情况下,在置信关系下区分两个对象没有意义,即只有在同一置信优势类中的对象在决策序上才是可比较的。

本文提出满足不协调置信优势原理关系的两个对象才可区分,即两个对象条件属性上满足置信优势关系,而决策属性不满足;进一步给出基于不协调优势原理的约简定义、判定定理和辨识矩阵,从而得到了在不完备决策系统下新的知识约简方法。

本文第2节简单回顾不完备有序决策系统和置信优势关系的定义,第3节给出基于不协调置信优势原理关系的约简理论和约简方法;第4节给出实例说明;最后总结全文。

2 基础理论

定义 1^[4](不完备有序决策系统) 设有一个决策系统 $DS=(U, A, V, f)$, 其中, U 是论域, 即非空的对象集合; A 是属性集合, $A=C \cup D$, 其中 C 和 D 分别表示条件属性集和决策属性集; V 是属性值域, 具有偏好; $f: U \times A \rightarrow V$ 是信息函数, $f(x_i, a) = v_a$ 表示对象 x_i 在属性 a 上的取值。如果所有的属性值都已知, 则称其为完备有序决策系统; 如果存在缺失值, 则称其为不完备有序决策系统(Incomplete Ordered Decision System, IODS), 缺失值用“*”表示。

设 $a \in A$ 具有偏好有序关系, 记为 $\geq_a$ 。 $x \geq_a y$ 表示在属性 a 上对象 x 至少和 y 一样好。增序偏好下, $x \geq_a y$ 表示 $f(x, a) \geq f(y, a)$; 降序偏好下, 则表示 $f(x, a) \leq f(y, a)$ 。为便于讨论, 在不作特别说明的情况下, 将采用增序偏好。

定义 2^[4](置信优势关系) 设不完备有序决策系统 $IODS=(U, A, V, f)$, 其中 $x, y \in U, B \subseteq A, P_B = \{b | b \in B \wedge f(x, b) \neq * \}$, 用 $CDR_B^{\geq}$ 表示置信优势关系, 定义如下:

$$CDR_B^{\geq} = \{ (x, y) \in U^2 \mid |P_B(x) \cap P_B(y)| / |P_B(x)| = 1 \} \\ \wedge \forall q \in B ((f(x, q) = * \wedge f(y, q) = *) \vee (f(x, q) = * \wedge f(y, q) \neq *) \vee (f(y, q) \geq f(x, q)))$$

通过置信优势关系 $CDR_B^{\geq}$, 可得到如下置信优势类和置信劣势类。

$$[x]_B^{\geq} = \{ y \in U : (x, y) \in CDR_B^{\geq} \}$$

$$[x]_B^{\leq} = \{ y \in U : (y, x) \in CDR_B^{\geq} \}$$

性质 1

(1) 置信优势关系具有自反性、传递性及反对称性。

(2) 设 $B \subseteq C$, 有 $[x]_B^{\leq} \subseteq [x]_C^{\leq}$ 。

3 不协调置信优势原理关系的约简

3.1 不协调置信优势原理关系约简理论

回顾经典粗糙集, 两个满足等价关系的对象不可区分。同样地, 在置信优势关系粗糙集中满足置信优势关系的对象之间不可区分。然而, 由性质 1(1)可知, 置信优势关系下, 对象在条件属性集合下是偏序关系, 并非所有对象可比较。即便对象在条件属性集合下具有置信优势关系, 但若不考虑它们的决策偏好, 也是没有意义的。

首先给出置信优势原理: 当一个对象 x 的所有属性在置信优势关系下都不劣于另一个对象 y 时, x 的决策也不劣于

y , 我们说对象 x 和 y 满足置信优势原理。因此, 我们认为满足置信优势原理的对象在置信优势关系上不可区分。

例 1 本文选用文献[11]的数据作为实例(见表 1)。对象 X_4 和 X_6 在属性集 $C = \{A_1, A_2, A_3\}$ 上不可比较; 同样, X_3 和 X_7 在置信优势关系下也是不可比较的。对象 X_1 在属性集合 $C = \{A_1, A_2, A_3\}$ 上置信优势于 X_3 , 而对象 X_1 的决策也优于 X_3 , 那么从置信优势关系原理出发, X_1 和 X_3 是不可区分的。观察对象 X_3 和 X_8 , X_8 在条件属性 $C = \{A_1, A_2, A_3\}$ 上置信优势于 X_3 , 而 X_8 决策上却劣于 X_3 , 不满足置信优势原理, 因此认为这两个对象在属性 $\{A_2\}$ 上是有区分的。

表 1 数据集

	A1	A2	A3	D
X1	4	4	3	4
X2	3	2	3	3
X3	4	*	2	3
X4	2	2	2	2
X5	2	1	2	2
X6	3	1	2	1
X7	*	2	2	2
X8	4	1	2	2
X9	3	*	2	3
X10	4	3	3	3

下面给出置信优势原理关系的定义。

定义 3(置信优势原理关系) 设不完备有序决策系统 $IODS=(U, C \cup D, V, f)$, 其中 $x, y \in U$, 置信优势原理关系定义如下。

$$CDP^{\geq}(C|D) = \{ (x, y) : (x, y) \in CDR_C^{\geq} \wedge (x, y) \in CDR_D^{\geq} \}$$

根据定义 3 可知, 置信优势原理关系表示两个对象在条件属性及决策属性下均满足置信优势关系。

定义 4(不协调置信优势原理关系) 设不完备有序决策系统 $IODS=(U, C \cup D, V, f)$, 其中 $x, y \in U$, 不协调置信优势原理关系定义如下。

$$ICDP^{\geq}(C|D) = \{ (x, y) : (x, y) \in CDR_C^{\geq} \wedge (x, y) \notin CDR_D^{\geq} \}$$

根据定义 4, 不协调置信优势原理关系表示两个对象在条件属性集上满足置信优势关系, 而在决策属性上不满足。

性质 2 设不完备有序决策系统 $IODS=(U, A, V, f)$, $A=C \cup D, B \subseteq C$ 。

$$(1) CDP^{\geq}(C|D) \subseteq CDP^{\geq}(B|D);$$

$$(2) ICDP^{\geq}(C|D) \subseteq ICDP^{\geq}(B|D)。$$

定义 5 若 $ICDP^{\geq}(C|D) = ICDP^{\geq}(B|D)$, 则称 B 是 $ICDP^{\geq}$ 的不协调置信优势原理关系的协调集。若 B 的任何真子集不是 $ICDP^{\geq}$ 的协调集, 则称 B 是不完备有序决策系统 $IODS$ 的不协调置信优势原理关系约简($ICDP^{\geq}$ 约简)。

定理 1(判定定理) B 是 $ICDP^{\geq}$ 的协调集 $\Leftrightarrow$ if $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$, then $(y, x) \notin CDR_B^{\geq}$ 。

证明: “ $\Rightarrow$ ”。假定 if $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$, then $(y, x) \notin CDR_B^{\geq}$ 不成立, 则有 $(y, x) \in CDR_B^{\geq}$ 。由于条件 B 是 $ICDP^{\geq}$ 的协调集, 有 $ICDP^{\geq}(C|D) = ICDP^{\geq}(B|D)$, 即 $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$, 则必然 $(x, y) \in ICDP^{\geq}(B|D)$, 当 $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$, 则 $(x, y) \in CDR_B^{\geq}$ 与假设条件矛盾。故 B 是 $ICDP^{\geq}$ 的协调集时, if $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$, then $(y, x) \notin CDR_B^{\geq}$ 。

“ $\Leftarrow$ ”。由性质 2(2)可知 $ICDP^{\geq}(C|D) \subseteq ICDP^{\geq}(B|D)$, 因此只需证明 $ICDP^{\geq}(B|D) \subseteq ICDP^{\geq}(C|D)$ 。假定存在 $(x, y) \notin ICDP^{\leq}(B|D)$ 且 $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$, 由条件的逆否命题可知, 对任意的 $(y, x) \in CDR_B^{\geq}$, 则 $(x, y) \notin ICDP^{\geq}(C|D)$, 显然与假设条件矛盾。因此 $ICDP^{\geq}(B|D) \subseteq ICDP^{\geq}(C|D)$ 。综合 $ICDP^{\geq}(C|D) = ICDP^{\geq}(B|D)$, 得证。

3.2 不协调置信优势原理关系约简方法

本节将给出协调置信优势原理关系的约简方法, 首先给出以下定义和定理。

定义 6 设不完备有序决策系统 $IODS = (U, C \cup D, V, f)$, 其中 $B \subseteq C$, 对任意的 $x, y \in U$, 则

$$D^{\geq}(x, y) = \begin{cases} \{a \in C: (y, x) \notin CDR_B^{\geq}\}, & (x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D) \\ C, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$M^{\geq} = (D^{\geq}(x, y), x, y \in U)$ 表示 $IODS$ 的不协调置信优势原理关系的辨识矩阵。

性质 3 $M^{\geq} = (M^{\leq})'$ 。

证明: 由辨识矩阵定义可得。

性质 3 说明通过置信优势类得到的辨识矩阵与置信劣势类得到的辨识矩阵互为转置矩阵。

定理 2 设有序决策系统 $IODS = (U, C \cup D, V, f)$, 其中 $B \subseteq C$, B 是 $ICDP^{\geq}$ 的协调集, 当且仅当, 对任意的 $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$, 有 $D^{\geq}(x, y) \cap B \neq \emptyset$ 。

证明: “ $\Rightarrow$ ”。 B 是 $ICDP^{\geq}$ 的协调集, 有 $ICDP^{\geq}(C|D) = ICDP^{\geq}(B|D)$, 由定理 1 可知, 对任意的 $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$, 有 $(y, x) \notin CDR_B^{\geq}$, 显然 $D^{\geq}(x, y) \cap B \neq \emptyset$ 。

“ $\Leftarrow$ ”。根据条件, 任意 $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$, $D^{\geq}(x, y) \cap B \neq \emptyset$, 则表明 $(x, y) \notin CDR_B^{\geq}$, 且 $(y, x) \notin CDR_B^{\geq}$, 即 $(x, y) \in CDR_B^{\geq}$, 故 $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$ 。因此 B 是 $ICDP^{\geq}$ 的协调集。

定义 7 设不完备有序决策系统 $IODS = (U, C \cup D, V, f)$, 其中 $B \subseteq C$, $M^{\geq} = (D^{\geq}(x, y), x, y \in U)$ 为其不协调置信优势原理关系的辨识矩阵, 称 $F^{\geq} = \bigwedge \{ \bigvee \{ a_k: a_k \in D^{\geq}(x, y) \}, x, y \in U \}$, 即 $F^{\geq} = \bigwedge \{ \bigvee \{ a_k: a_k \in D^{\geq}(x, y) \}, (x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D) \}$ 为不协调置信优势原理上的辨识公式。

定理 3 设不完备有序决策系统 $IODS = (U, C \cup D, V, f)$, 辨识公式的极小析取范式为 $F^{\geq} = \bigvee_{k=1}^p (\bigwedge_{s=1}^q a_s)$, 记 $B_k = \{a_s, s=1, 2, \dots, q_k\}$, 则 $\{B_k = 1, 2, \dots, p\}$ 是所有 $ICDP^{\geq}$ 约简形式的集合。

证明: 对任意的 $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$, 由极小析取范式的定义知 $B_k \cap D^{\geq}(x, y) \neq \emptyset$, 再由定理 2 可知, B_k 是 $ICDP^{\geq}$ 协调集。同时, $F^{\geq} = \bigvee_{k=1}^p$ 在 B_k 中去掉一个元素形成 B_k' , 则必然存在 $(x, y) \in ICDP^{\geq}(C|D)$, 使得 $B_k' \cap D^{\geq}(x, y) = \emptyset$, 故 B_k' 不是 $ICDP^{\geq}$ 协调集。而辨识公式中包含了所有的 $D^{\geq}(x, y)$, 因此不存在其他 $ICDP^{\geq}$ 约简。

4 实例

本节将继续沿用例 1(见表 1), 根据第 2 节中的定理及辨识矩阵约简定义, 可得例 1 的不协调置信优势原理关系的辨识矩阵 $M^{\geq} = (D^{\geq}(x, y), x, y \in U)$ (见表 2)。

表 2 $M^{\geq}$ (辨识矩阵)

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
X1	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
X2	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
X3	C	C	C	C	C	C	C	A2	C	C
X4	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
X5	C	C	C	C	C	A1	C	C	C	C
X6	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
X7	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
X8	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
X9	C	C	C	C	C	A1	C	A1, A2	C	C
X10	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C

分析对象 $X1$ 和 $X2$ 可知, $X1$ 在所有属性 $C = \{A1, A2, A3\}$ 上都优于 $X2$, 同时 $X1$ 在决策上也优于 $X2$, 这在有序情形下是协调的且无法区分。文献[7-10, 13, 14]中对于有序系统的约简方法, 则将对象 $X1$ 和 $X2$ 视为需要区分的对象, 主要原因是把决策属性作为“类”来对待, 忽略了决策属性偏好有序的特性。本文则认为它们满足置信优势原理关系, 不需要区分, 充分考虑了对象在决策有序的特性。

$$F^{\geq} = A1 \wedge A2 \wedge (A1 \vee A2) = A1 \wedge A2$$

因此, 我们得到 $\{A1, A2\}$ 是例 1 的不协调置信优势原理关系的 $ICDP^{\geq}$ 约简。根据性质 3, 同样可以轻松得到 $ICDP^{\leq}$ 约简也是 $\{A1, A2\}$ 。

结束语 知识约简是粗糙集及其扩展理论的核心问题之一, 目的是获得更为简洁的规则。在经典粗糙集下, 满足等价关系的对象不可区分。因此, 本文考虑在置信优势关系下, 两个对象如果满足置信优势原理关系则不可区分。提出不协调置信优势原理关系, 在此基础上给出约简的定义, 进一步给出了不协调置信优势原理关系约简的判定定理及辨识矩阵, 从而提供了不完备信息系统下的知识约简的具体操作方法。

参考文献

- [1] Dembczyński K, Greco S, Kotłowski W, et al. Quality of rough approximation in multi-criteria classification problems [M] // Rough Sets and Current Trends in Computing. Springer Berlin Heidelberg, 2006: 318-327
- [2] Greco S, Matarazzo B, Slowinski R. Rough Approximation by Dominance Relations [J]. International Journal of Intelligent Systems, 2002, 17(2): 153-171
- [3] Pawlak Z, Skowron A. Rudiments of rough sets [J]. Information Sciences, 2007, 177(1): 3-27
- [4] Gou Guang-lei, Wang Guo-yin, Li Jie, et al. Confidential dominance relation based rough approximation model [J]. Control and Decision, 2014, 29(7): 1325-1329 (in Chinese)
- [5] Susmaga R, Slowinski R. Generation of rough sets reducts and constructs based on inter-class and intra-class information [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2015, 274(1): 124-142
- [6] Jia X, Shang L, Zhou B, et al. Generalized attribute reduct in rough set theory [J]. Knowledge-Based Systems, 2016, 91: 204-218
- [7] Xu W H, Zhang W X. Methods for knowledge reduction in inconsistent ordered information systems [J]. Journal of Applied Mathematics and Computing, 2008, 26(1): 313-323
- [8] Xu W H, Li Yuan, Liao Xiu-wu. Approaches to attribute reductions based on rough set and matrix computation in inconsistent

- ordered information systems[J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 27(3): 78-91
- [9] Inuiguchi M, Yoshioka Y. Several reducts in dominance-based rough set approach[M]//Interval/Probabilistic Uncertainty and Non-Classical Logics. Springer Berlin Heidelberg, 2008: 163-175
- [10] Kusunoki Y, Inuiguchi M. A unified approach to reducts in dominance-based rough set approach[J]. Soft Computing, 2010, 14(5): 507-515
- [11] Susmaga R. Reducts and constructs in classic and dominance-based rough sets approach[J]. Information Sciences, 2014, 271(7): 45-64
- [12] Du W S, Hu B Q. Approximate distribution reducts in inconsis-

- tent interval-valued ordered decision tables[J]. Information Sciences, 2014, 271(7): 93-114
- [13] Shao M W, Zhang W X. Dominance relation and rules in an incomplete ordered information system[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2005, 20(1): 13-27
- [14] Yang X B, Yang J Y, Wu C, et al. Dominance-based rough set approach and knowledge reductions in incomplete ordered information system[J]. Information Sciences, 2008, 178(4): 1219-1234
- [15] Yang X B, Yu D J, Yang J Y, et al. Dominance-based rough set approach to incomplete interval-valued information system[J]. Data & Knowledge Engineering, 2009, 68(11): 1331-1347

(上接第 187 页)

行比较分析,提出针对固态硬盘连接算法的优化方法和建议。但固态硬盘仍是块存储设备,文件读取速度不能与非易失性内存相比。文献[20]提出了对非易失性内存的有限写操作的排序连接算法,通过先排序的方法调整数据的读写量,达到通过读来减少写的连接优化方法。随着大数据时代的到来,文献[21]对大数据连接的研究进展进行了分析介绍,并提出了一些相关问题和解决方案。

结束语 本文首先对比分析了传统磁盘文件系统和新型内存文件系统的特点,然后在两种文件系统上对连接操作进行性能测试分析。实验结果表明,内存文件系统能够显著提高连接操作的性能。相信内存文件系统能够突破传统的 I/O 瓶颈,给数据库性能带来巨大的提升。

对实验结果进行进一步分析,需要根据内存文件系统的特点设计全新的连接算法、优化系统配置甚至硬件设计等。本文结合实验结果和内存文件系统的特点对这些问题进行了讨论,并且提出了优化建议。我们将在未来的工作中实现并验证这些优化建议。

参 考 文 献

- [1] Myers D C. On the Use of NAND Flash Memory in High-Performance Relational Databases[D]. Massachusetts Institute of Technology, 2008
- [2] Wu X, Qiu S, Narasimha Reddy A L. SCMFS: A File System for Storage Class Memory and its Extensions[J]. ACM Transactions on Storage (TOS), 2013, 9(3): 1-11
- [3] Condit J, Nightingale E B, Frost C, et al. Better I/O through byte-addressable, persistent memory[C]//Proceedings of the ACM SIGOPS 22nd Symposium on Operating Systems Principles. ACM, 2009: 133-146
- [4] Dulloor S R, Kumar S, Keshavamurthy A, et al. System software for persistent memory[C]//Proceedings of the Ninth European Conference on Computer Systems. ACM, 2014: 1-15
- [5] Li Guan-zhao, Chen Si-tong, Zhen Zhen, et al. Join Algorithms Based on Fermi Architecture[J]. Computer Science, 2013, 40(3): 62-67(in Chinese)
- 李观钊,陈思桐,甄真,等. 基于 Fermi 架构的 Join 算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(3): 62-67
- [6] Sha E H M, Chen Xian-zhang, Zhuge Qing-feng, et al. Designing an efficient persistent in-memory file system[OL]. <http://cacs.cqu.edu.cn/wp-content/uploads/2015/02/TR-2014-02-Designing-an-efficient-persistent-in-memory-file-system.pdf>
- [7] Ext4 wiki[OL]. <https://ext4.wiki.kernel.org>
- [8] Raoux S, Burr G W, Breitwisch M J, et al. Phase-change random

- access memory: A scalable technology[J]. IBM Journal of Research and Development, 2008, 52(4/5): 465-479
- [9] Jung M, Shalf J, Kandemir M. Design of a large-scale storage-class RRAM system[C]//Eugene, Oregon, USA: Proceedings of the 27th International ACM Conference on International Conference on Super Computing. ACM, 2013: 103-114
- [10] Chua L. Resistance switching memories are memristors[J]. Applied Physics A, 2011, 102(4): 765-783
- [11] Kerman J. Toward a Universal Memory[J]. Science, 2005, 308(5721): 508-510
- [12] Chen S, Gibbons P B, Nath S. Rethinking Database Algorithms for Phase Change Memory[C]//Proceedings of the 5th Biennial Conference on Innovative Data System. 2011: 21-31
- [13] Jung M, Shalf J, Kandemir M. Design of a large-scale storage-class RRAM system[C]//Proceedings of the 27th International ACM Conference on International Conference on Supercomputing. ACM, Eugene, Oregon, USA, 2013: 103-114
- [14] Liu R, Shen D, Yang C, et al. NVM duet: unified working memory and persistent store architecture[J]. ACM Sigplan Notices, 2014, 42(1): 455-470
- [15] Jung J, Cho S. Memorage: emerging persistent RAM based malleable main memory and storage architecture[C]//Proceedings of the 27th International ACM Conference on International Conference on Supercomputing. ACM, Eugene, Oregon, USA, 2013: 115-126
- [16] Mishra P, Eich M H. Join processing in relational databases[J]. ACM Comput. Surv., 1992, 24(1): 63-113
- [17] Elmasri R A, Navathe S B. Fundamentals of Database Systems[M]. Addison-Wesley Longman Publishing Co., 1999: 1009
- [18] Han Xi-xian, Yang Dong-hua, Li Jian-zhong. DBCC-Join: A Novel Cache-Conscious Disk-Based Join Algorithm[J]. Chinese Journal of Computers, 2010(08): 1500-1511(in Chinese)
- 韩希先,杨东华,李建中. DBCC-Join: 一种新的高速缓存敏感的磁盘连接算法[J]. 计算机学报, 2010(8): 1500-1511
- [19] Do J, Patel J M. Join processing for flash SSDs: remembering past lessons[C]//Proceedings of the Fifth International Workshop on Data Management on New Hardware. ACM, Providence, Rhode Island, 2009
- [20] Viglas S. Write-limited sorts and joins for persistent memory[J]. PVLDB, 2014, 7(5): 413-424
- [21] Pang Jun, Yu Ge, Xu Jia, et al. Similarity Joins on Massive Data Based on MapReduce Framework[J]. Computer Science, 2015, 42(1): 1-5(in Chinese)
- 庞俊,于戈,许嘉,等. 基于 MapReduce 框架的海量数据相似性连接研究进展[J]. 计算机科学, 2015, 42(1): 1-5