

不确定性键值对数据模型及改进 Top-k 查询算法

易 俗¹, 吴亚坤¹, 付天宇², 张一川²

¹(辽宁大学 计算中心 沈阳 110031)

²(东北大学 软件学院 沈阳 110819)

E-mail: zhangyc@swc.neu.edu.cn

摘 要: 现有基于可能世界建模的 Top-k 算法难以适应大数据量和键值对 (Key-Value) 数据模型下的不确定性 Top-k 查询. 研究首先建立了不确定性 Key-Value 数据模型; 随后在已有 U-TopK 查询语义的基础上, 提出了优化的 EU-TopK (Early Terminated Uncertain Top-k Query) 算法, 该算法优先建立以最可能的 Top-k 元组为树根的可能世界树形结构, 并利用两种优化策略来优化算法, 降低了元组访问深度, 使得该算法在时间复杂度上较原算法有所改进. 此外采用 MapReduce 实现 EU-TopK 算法, 使 EU-TopK 能够适应大数据分析. 最后, 通过实验验证 EU-TopK 算法功能性, 并对其查询时间、扫描深度进行评价.

关键词: 不确定性数据; Top-k 查询; MapReduce; 大数据; 键值对数据

中图分类号: TP311

文献标识码: A

文章编号: 1000-1220(2015)12-2656-06

An Uncertain Key-value Data Model and Improved Top-k Query Algorithm

YI Su¹, WU Ya-kun¹, FU Tian-yu², ZHANG Yi-chuan²

¹(Computing Center, Liaoning University, Shenyang 110031, China)

²(Software College, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The existing researches, most of which are based on possible world model, are unsuitable to big data and key-value data model. This research first designs a new key-value data model for uncertain data; secondly proposes EU-TopK (Early Terminated Uncertain Top-k Query) algorithm which optimizes the original U-TopK algorithm by searching for suitable termination conditions and using efficient data structure. Different from U-TopK algorithm, the EU-TopK algorithm uses the most favorable Top-k records with a relatively greater possibility as the first choice as the root of a possible world tree. Furthermore, the research designs MapReduce-based EU-TopK which can be well adopt in the Big Data analyze. The functionality, query time and scan depth of EU-TopK is proved by experiments.

Key words: uncertain data; Top-k query; MapReduce; big data; Key-Value data

1 引言

不确定性数据是指不精确数据, 如感知数据的设备误差; 或模糊数据, 如隐私保护中敏感信息的模糊化; 或缺失数据, 如 RFID (Radio Frequency Identification Data) 数据等^[1]. 由于设备故障、环境干扰以及隐私保护等因素, 不确定性数据普遍存在于军事、物流、金融、电信等领域, 并在市场分析、LBS 服务中获得广泛应用. 随着用户需求的不断提高与不确定数据规模的迅速膨胀, 基于不确定性数据的查询操作面临巨大挑战. 如何高效处理大规模不确定性数据日益成为科研人员的研究热点^[2, 3]. 若通过插入新值或删除原值等方法简单处理不确定性数据可能会丢失重要信息, 所以亟需一种有效的不确定性数据查询算法.

很多新型的数据库都采用键值对 (Key-Value) 数据模型来存储和管理大数据. Key-Value 数据模型中每一行 (Row) 代表一个实体 (Entity), 行由单一行键 (RowKey) 和若干列

(Column) 组成. 每一行 (Row) 都有一个唯一标识为行键 (RowKey). 列 (Column) 是实体 (Entity) 的属性 (Attribute), 列包含键/值对 (Key-Value Pair) 和时间戳 (TimeStamp). 其中“键” (Key) 为属性名, “值” (Value) 表示属性值. 时间戳 (TimeStamp): 在一行 (Row) 中, 相同列名 (Key) 的列包含了多个不同版本的列值 (Value). 时间戳 (TimeStamp) 用来标记列值的版本信息. 时间戳可以由数据库管理系统自动地创建和回收. 数据管理系统应提供如“为新数据加上时间戳”、“按时间区间或版本个数回收时间戳”等管理方式. Key-Value 数据模型因 Key-Value 数据结构简洁、存储占用小、数据冗余低等特点, 较关系型数据模型更适合大规模数据的存储. 同时, Key-Value 数据模型在并发操作与数据扩展等方面也有着出色表现. 但 Key-Value 数据模型尚不能很好的支持不确定性数据, 不确定性 Key-Value 数据模型亟待研究.

另一个方面, 在大数据环境中应用最广泛的 Top-k 查询返回 k 个最为匹配 (分值最高) 的元组. 对于确定型数据, 这

收稿日期: 2014-09-24 收修改稿日期: 2014-12-12 基金项目: 国家自然科学基金项目 (61202088) 资助; 第 54 批中国博士后科学基金项目 (2013M540232) 资助; 教育部项目博士点基金项目 (20130042120006) 资助; 教育部项目基本科研业务费项目重大科技创新项目 (N120817002) 资助. 作者简介: 易 俗, 女, 1982 年生, 硕士, 实验师, 研究方向为云计算与数据管理; 吴亚坤, 女, 1966 年生, 硕士, 副教授, 研究方向为云计算与数据管理; 付天宇, 男, 1991 年生, 硕士研究生, 研究方向为云计算; 张一川, 男, 1981 年生, 博士, 讲师, 研究方向为云计算与迭代计算.

种查询语义是精确无歧义的. 然而, 由于不确定数据元组取值的不确定性, 这种精确无歧义查询直接作用于此类数据无法获得一致、精确的解. 需根据元组取值概率分布与应用场景需要对元组进行选择, 不同应用场景下的查询结果可能完全不同. 因此, 需改进现有 Top-k 查询, 使其兼容不确定性数据, 提供歧义性查询语义的解决方案^[4].

综上所述, 研究内容有以下几点: ① 建立不确定性数据查询问题的抽象模型; ② 提出不确定性 Key-Value 数据模型; ③ 提出适应不确定性 Key-Value 数据模型和大数据特征的 Top-k 查询算法, 使用树形结构建立可能世界空间实例, 并找出有效的算法终止条件, 设计打分函数, 解决可能世界空间随数据增加呈指数增长的问题, 使其更适用于大数据环境; ④ 基于 MapReduce 的不确定性数据 Top-k 查询算法实现, 利用 MapReduce 对数据进行选择操作的同时计算每条数据的打分函数值, 以应对大数据量, 有效减少参与构建可能世界空间的记录个数.

2 相关工作

近年来, 由于不确定性数据的应用需求越来越多, 研究者们对此类数据的查询处理关注度也越来越高. 一方面, 研究者们从不确定性数据模型出发, 尝试改进不确定性数据模型存储结构, 应对不同应用场景下复杂数据类型的存储瓶颈, 并提高存储模型的可扩展性能. 通过分析不确定性数据模型的类型与现有模型的特点, 文献[5]实现了一个双层结构的不确定性数据模型以存储和操作不确定性数据: 底层模型完备、复杂, 构成整体模型核心; 上层模型精简、不完备, 提供底层模型的简化表示. 文献[6]基于不确定数据查询特征, 引出概率查询的概念. 通过对查询结果进行量化, 将查询结果概率作为度量筛选满足应用场景的查询结果. 而 Skyline 查询也随着多决策准则不确定数据模型的出现得到较广泛的应用^[7].

另一方面, 研究者们针对不确定性 Top-k 的查询语义和查询处理也做出了大量研究. 文献[3]结合不确定数据取值及其概率提出了排序查询的概念, 并基于排序查询得到了传统 Top-K 查询的改进算法 U-kRanks. 文献[8]提出了基于阈值的概率查询 PT-k. Cormode 等人提出了期望排序查询^[9]. 但是, 由于不确定性数据库的概率 Top-k 和排序查询是全新的查询语义, 因此自文献[3]提出这一概念以来, 国内目前针对这一领域鲜有研究性工作. 此外, 针对用户提交模糊的或不确定性查询条件研究更是少之又少^[10].

本文以 Top-K 为例, 基于 Key-Value 数据模型和 MapReduce 编程范型, 通过建立合适的数据模型, 采用合适的数据结构, 寻找算法终止条件来进行优化, 使得不需要建立完整的可能世界就能提前确定查询结果, 以此解决海量数据带来的问题, 与现有研究有本质区别.

3 数据模型

本文分析现有不确定性数据模型, 总结以下局限性:

- ① 现有不确定性数据模型很多是完备模型. 一般而言, 完备意味着变量的约束可以任意. 但在实际的应用中, 变量约束的任意性会导致读取和推理的代价很高;
- ② 很多不确定性数据模型都与某种数据形式紧密关联,

针对性很强, 可扩展性不强. 如关系型、半结构化、数据流、高维数据中的不确定性数据模型.

③ 很多已有数据模型并不适合大规模批量处理. 在进行数据查询处理时, 如不确定性 Top-k 查询时, 需要对海量数据做基于某一逻辑的预处理, 或者对保存在分布式文件系统的数据进行预处理, 而以往的很多模型, 如不确定性关系数据模型, 并不适用于分布式处理.

本文对 Key-Value 数据模型进行扩展, 使其更适于不确定性数据, 记作 KVP (Key-Value-Possibility) 模型, 如图 1 所示. KVP 模型较传统的不确定性数据模型, 如不确定关系型模型, 更适合大数据和分布式环境.

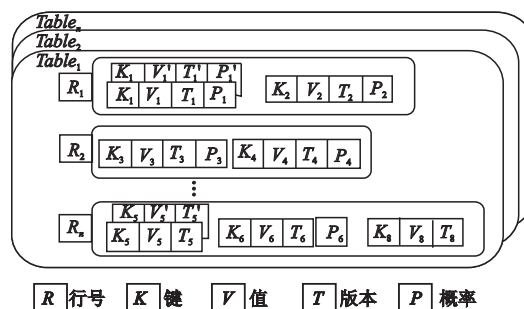


图1 不确定性数据键值对模型

Fig. 1 Key-Value data model of uncertain data

该模型为每一个键值对增加了“概率”属性, 由于键值对数据是一种松散的哈希表结构, 因此, 每一个键可以有不同的值和不同的“概率”属性, 在 KVP 模型将其简化为多个键值对处理. KVP 模型不仅保留了 Key-Value 数据模型较传统的关系型数据库所具有的种种优势, 而且适应了文献[11]所述不确定性数据库中属性级不确定性的情况. 首先, 此模型针对概率型数据, 可以包含多个不确定性属性, 并分别保存了每个不确定性属性取值的概率. 当概率值为 0 时, 表示该属性为确定性属性. 然后, 此模型不必考虑像在关系型数据模型中涉及表之间进行连接操作时概率的计算以及可能世界空间的建立问题. 最后针对海量数据, 该数据模型简洁易扩展, 可以进行逻辑统一的分布式并行处理.

针对概率型数据建模的方法有很多, 本研究建模方法是基于可能世界的语义模型^[11].

定义 1. 可能世界模型 (Possible World Model) 可能世界空间由一系列可能世界实例组成, 即 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$. 并且 $p: w \rightarrow [0, 1]$ 是一个概率分布 (即 $\sum_{i=1}^m P(w_i) = 1$). 对于任意一个 $P(w_i) > 0$, 那么 w_i 称为一个可能世界实例. 每一个可能世界实例对应一个确定性数据集, 其中, 那些非不确定性属性是满足约束条件的确定值.

由上文定义可得, 对于有 N 条元组的数据集 D 来说, 即 $D = \{(t_1, P(t_1)), (t_2, P(t_2)), \dots, (t_n, P(t_n))\}$, 那么根据每条元组是否出现在某一可能世界中, 对于 D 可得到 2^n 种不同组合, 即 2^n 组成的集合就是可能世界空间 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$. 对于每个可能世界可以用一个概率 p 描述该可能世界发生的概率. 可能世界模型具有以下性质:

对于 KVP 模型, 根据定义 1, 设 t 是数据集 D 上一个元组 t 的不确定性属性发生的概率记为 $P(t)$, 可得该属性不发

生的概率为 $1 - P(t)$. 而一个元组 t 对于一个可能世界实例 w_k 来说, 只有两种选择: ① 出现在可能世界实例 w_k 中, 则在 w_k 中记为 t , 概率为 $P(t)$; ② 不出现在可能世界实例 w_k 中, 则在 w_k 中记为 $\neg t$, 概率为 $1 - P(t)$. 那么一个可能世界实例的概率值计算如公式 (1).

假设 Z^* 是一个正整数集, 不确定性元组 t_1, t_2, \dots, t_m 出现在可能世界实例 w_k 中, 不确定性元组 t_{m+1}, \dots, t_n 不出现在 w_k 中, 则 $w_k = \{t_1, \dots, t_m, \neg t_{m+1}, \dots, \neg t_n\}$, μ_{w_k} 的概率值为:

$$P(w_k) = \prod_{i=1}^m P(t_i) * \prod_{j=m+1}^n (1 - P(t_j)) \quad (1)$$

易知, 可能世界实例是由元组的任意合法组合构成的.

4 U-TopK 算法改进

U-TopK 查询语义是建立一个完整世界, 这个完整世界包含了所有的可能世界, 并返回可能世界中具有最大概率的 Top-k 记录向量.

定义 2. U-TopK 查询语义 (U-TopK Query Semantics).

存在一个基于概率的不确定性数据库 A , $\rho w = \{\rho w_1, \rho w_2, \dots, \rho w_n\}$ 是 A 中所有可能世界语义空间, 有长度为 K 的元组向量 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$, 对于任意一个元组向量 $R_i \in R$ 都有: ① R_i 中的元组依照打分函数 $score$ 进行排序; ② R_i 是非空可能世界 $\rho w(R_i) \subseteq \rho w$ 的 Top-k 结果. U-TopK 查询结果返回一个元组向量 $R_p \in R$, 它在所有的可能世界集合 ρw 上成为 Top-k 的联合概率最高, 即:

$$R_p = \operatorname{argmax}_{R_i \in R} \sum_{w \in \rho w(R_i)} P_r(w) \quad (2)$$

其中 w 是可能世界集合 $\rho w \subseteq \rho w$, $P_r(w)$ 表示元组向量 R_i 向成为 w 中 Top-k 查询结果的概率^[4].

U-TopK 查询语义立足于空间搜索, 在平衡分值与概率的基础上先排序后求取概率. 它首先将每个可能世界空间记录按打分函数排序, 截取每个可能世界空间的前 k 个记录. 也即一个排序序列, 长度为 k , 与 k 长度排序序列所在的可能世界相同, 每个排序序列都有存在概率, U-TopK 的解就是拥有最大存在概率的 k 长度排序序列. 首先按打分函数将各元组降序排列, 然后依次缩小其构造的搜索空间的范围, 直到返回前 k 个查询结果.

传统 U-TopK 算法的基本思想:

① 建立一个队列 Q , 表示一个可能世界, 初始化时队列为空, 并定义此时的概率为 1.

② 将第一个可能世界 ρw_1 的按打分函数降序排列的 Top-k 查询结果 R_1 和其概率 p_1 插入到队列 Q .

③ 依次插入剩下的可能世界, 并将返回结果同为 R 的概率 p 累加. 从队列末尾不断检查, 当 $P(Q_n) > P(Q_{n-1})$ 就将 $P(Q_n)$ 前移, 最后把队列 Q 的首位返回.

U-TopK 算法时间复杂度为 $O(nk)$, 当数据量很大时, 构造完整的可能世界仍然很耗时. 本研究提出 EU-TopK (Early Terminated Uncertain Top-k Query) 算法, 该算法通过研究 U-TopK 查询语义, 得出提前终止算法的重要条件, 并在 EU-TopK 算法中采用有效数据结构对 U-TopK 传统进行优化, 使优化后的 EU-TopK 算法较原算法时间空间效率都得到提高.

根据定义 1, 记可能世界空间 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$, 并且

满足 $\sum_{i=1}^m P(w_i) = 1$, 可得定理 1 及定理 2 作为 EU-TopK 算法终止的条件.

定理 1. 如果任意一个可能世界 w_i 的概率大于等于 0.5, 即 $P(w_i) \geq 0.5$, 那么可能世界 w_i 中的 Top-k 个元组就是 EU-TopK 查询返回的结果.

证明: 根据性质 2 $P(w_i) \geq 0.5$ 时, 则 $1 - P(w_i) \leq 0.5$. 剩下的查询结果为 R_k 的各个可能世界概率加起来小于 0.5, 故公式 (4) 成立.

定理 2. 在元组向量 R 中选择 $P(t)$ 值最大的元组集合, 优先构造包含他们的可能世界, 并累加符合条件可能世界概率值获取其联合概率, 如果能够确定不会再有其他联合概率大于该概率, 那么算法终止; 否则, 在元组向量 R 中选择 $P(t)$ 值第二大的一组元组集合重复该过程, 直到第 m 组, 若剩下的概率小于前面联合概率最大的一组, 则算法终止. 即此时 m 是使得下式成立的最小值.

$$\max_{1 \leq i \leq m} P_i > 1 - \sum_{1 \leq j \leq i} P_j \quad (3)$$

证明: 因为 $P(t) \leq 1$, 所以任意 k 个元组构成的可能世界的概率为 $\prod P(t)$. 选择 $P(t)$ 值最大的元组集合构成的可能世界的概率, 即 $\prod P(t)$ 最大. 又因为性质 2, 全部可能世界的概率之和为 1, 公式 (4) 成立时, 根据 EU-TopK 查询语义, 查询结果就是前面联合概率最大的一组.

假设有树形结构 T , T 的树根是可能的 Top-k 查询结果, EU-TopK 算法通过建立以 Top-k 查询结果为该树根的全部可能世界树形结构实现. 算法步骤如下:

1) 将基于分值的数据按照不确定性属性概率 $P(t)$ 降序排列, 并取得前 k 个元组作为树的根节点, 准备建立 k 元组可能世界. 在实现算法时, 采用大小为 k 的堆来实现这个目标.

2) 建立候选集 CS (Candidate Set). 将可能以该 k 元组作为 Top-k 查询结果返回的全部可能世界的其他元组加入该候选集中.

3) 在该根节点上, 将候选集 CS 中的元组依次作为其子节点, 生成一系列不同的 $k+1$ 元组可能世界, 其中树的权值为元组概率.

4) 重复过程 3), 依次以 3) 中子节点作为父节点, 再添加 CS 中元组生成不同可能世界, 最终建立一个等同可能世界空间的树, 最终树的权重就是 EU-TopK 算法返回树根节点 k 条元组的概率 p . 在实现算法时, 为避免可能世界实例重复, 可以通过实现候选集元素的排列组合来实现这个目标.

5) 其中, 按照定理 1 及定理 2, 可通过算法终止条件优化算法. 若 $p \geq 0.5$, 算法终止, 该概率 p 对应的树根 k 元组就是查询结果. 反之, 选择按概率 $P(t)$ 降序排列第二大的一组 k 元组重复步骤 (2), 并计算该树权值, 重复此步骤直到第 n 棵树, 满足剩余概率小于前 n 棵树概率最大的某一棵树 p_i . 则此时算法终止, 此时的 n 也称为算法的扫描深度. 树 p_i 的根节点就是 EU-TopK 查询结果. EU-TopK 的算法伪代码如算法 1 所示.

算法 1. EU-TopK 算法

Algorithm1. EU-TopK algorithm

function createSpaceTree(R)

```

1) result[n] = the set of probabilities for possible world trees have ever
   computed
2) Sorting elements in R descendingly
3) While ( true)
4)   r[k] = top k tuples of the first tuple vector in R ,sorting by tuples'
     score.
5)   Remove the first vector from R
6)   Create tree of possible world as T
7)   Root of T = r[k]
8)   addChildNodes( r[k] ,CandidateSet ( r[k] ))
9)   sum = sum of possibility of all leaves in T
10)  If ( sum ≥ 0.5)
11)    Return r[k]
12)  End if
13)  If ( the sum of rest probabilities is less than the maximum proba-
     bility in result[n] )
14)    Return the top k tuples of the tuple vector with the maximum
     probability in result[n]
15)  End if
16)  Put sum into result[n]
17) End While

```

function addChildNodes(parent_tuples ,CS)

```

1) If ( CS is empty)
2)  For each tuple in CS
3)   child_tuples = combination of parent_tuple and the tuple
4)   Make child_tuples a leaf node of parent_tuples
5)   Remove the tuple from CS
6)   addChildNodes( child_tuples ,Candidate_Set( child_tuples ))
7)  End for
8) End if

```

function CandidateSet (r [])

```

1) Return the set of other tuples of tuple vectors which may return r []
   as Top-k query result

```

综上所述,优化后的算法寻找正确的算法终止条件,使得不用遍历全部可能世界实例就找出答案.分析 EU-TopK 算法可知,使用大小为 k 的堆作为可能世界树形结构的树根,则优化后的算法的时间复杂度为 $O(n \log k)$,其中 k 表示算法的扫描深度.对比优化前算法时间复杂度 $O(nk)$,可知 EU-TopK 算法时间复杂度更低.

5 MapReduce 实现

利用 MapReduce 可以对数据进行选择运算,避免全部数据参与建立可能世界空间.基于 MapReduce 架构的不确定性数据操作模块可以分为以下六个部分:

- 1) 输入流模块: 输入模块负责把输入的不确定性数据分成 64MB 或者 128MB 的小数据块,然后把它们传给 Map 模块.
- 2) Map 模块: Map 模块得到每一个 $key/value$ 对,处理后产生一个或多个 $key/value$ 对.输入 $key/value$ 对与输出 $key/value$ 对不同.输出 $key/value$ 键值对被处理成适合在 Reduce 函数中计算打分函数值的形式.在 Map 模块,实现对数据的选择运算,将明显不符合查询条件的数据或用户要求的数据将被过滤掉,具体进行选择运算的条件有以下几种:

- ① 对不确定性数据的确定性属性取值进行选择运算,不

符合查询条件的记录被过滤.

- ② 对不确定性数据的不确定性属性上的属性值进行选择运算,不符合查询条件的记录被过滤.因为虽然该记录不确定性属性取值基于某一概率 $p(p \neq 0)$,但是该属性值取得其他值的概率为 0,所以该不确定性属性值不符合查询条件的的话可以被直接过滤.

- ③ 对不确定性数据的概率属性上小于某一约定阈值的数据进行选择运算.

- 3) Partition 模块: 它用于负责把上面输出的 key 映射到不同的 reduce 方法中去.这里框架会将 map 函数产生的中间键值对里键相同的值传递给一个 reduce 函数.

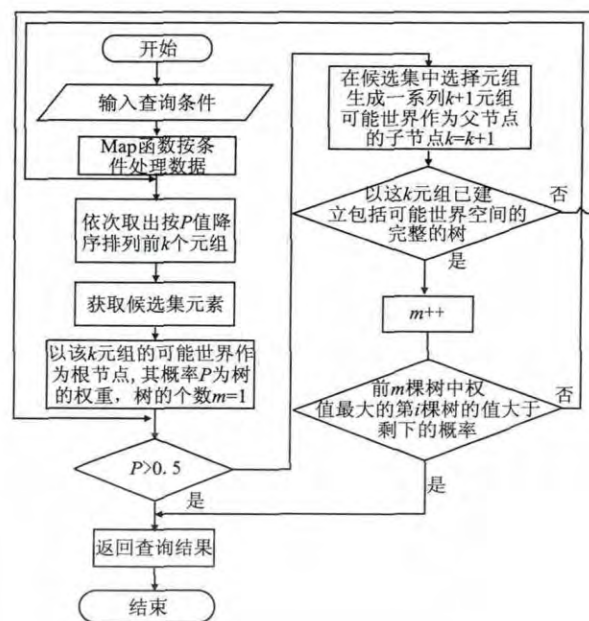


图2 EU-TopK 算法的 MapReduce 实现

Fig. 2 MapReduce based implementation of EU-TopK algorithm

- 4) Compare 模块: 对 reduce 所读入的数据进行比较.
- 5) Reduce 模块: 对上面已经排好序的并且带有相同 key 的数据进行迭代,根据打分函数计算元组的分值.
- 6) 输出模块: 把 reduce 的输出结果写到存储系统中,即将处理后的数据聚集到一起作为本文 EU-TopK 查询算法的输入.

根据上述 EU-TopK 算法的 MapReduce 设计可得其流程如图 2 所示.

6 性能评价

衡量算法效率的一个重要指标是算法运行时间.因此本文将 EU-TopK 算法的查询时间作为评价该算法性能的评价指标之一.另一方面,EU-TopK 算法的 MapReduce 实现过程通过构造以某 k 元组为 Top-k 查询结果的可能世界树形结构,则在返回最终结果前,被构造过的可能世界树形结构越少,算法的性能越好,则评价该算法性能的第二个指标为构造可能世界树形结构个数,即扫描深度.具体说明如下:

- 1) 查询时间(Query Time): EU-TopK 算法的查询时间是

MapReduce 分布式处理源数据开始,到返回最终查询结果 k 个元组经历的时间。

2) 扫描深度(Scan Depth): 不确定性数据集 D 中,扫描深度就是使下列条件成立的最小 n 值: 对于任意的 D' , D' 的前 n 个元组与 D 在相同的排序准则是一样的,在 D' 上的查询结果与在 D 上的查询结果一致。在实现 EU-TopK 算法时,优化策略是在元组向量 R 中选择 $P(t)$ 值最大的元组集合,优先构造包含他们的可能世界,称为可能世界树形结构,这个树形结构可以用大小为 k 的堆来实现,则每棵树型结构时间开销为 $O(\log k)$ 。然后累加符合条件可能世界概率值获取其联合概率,如果能够确定不会再有其他联合概率大于该概率,那么算法终止;否则,在元组向量 R 中选择 $P(t)$ 值第二大的元组集合重复该过程,直到第 n 组,若剩下的概率小于前面联合概率最大的一组,则算法终止,时间开销为 $O(n \log k)$ 。则已构造的可能世界树形结构越少,即 n 越小,算法能越快找到最终结果,算法的性能越好。

本研究通过 R-statistical(www.r-project.org) 产生综合数据集以控制数据的统计分布参数。每组实验使用 R-statistical 产生 600 万个属性值元组和对应该概率值作为实验数据集,实验数据中保持元组的分值服从均匀分布,控制元组的概率值分别服从均匀分布、正态分布和指数分布的情况下对 EU-TopK 算法的 MapReduce 实现的影响。表 1 中列举了五种不同分布状态。

表 1 符号及意义

Table 1 Notations and their meanings

符号	含义
uu	元组分值和概率均服从均匀分布
$un(0.5)$	元组分值服从均匀分布; 概率服从正态分布 均值 $\mu=0.5$
$un(0.9)$	元组分值服从均匀分布; 概率服从正态分布 均值 $\mu=0.9$
$uexp(0.2)$	元组分值服从均匀分布; 概率服从指数分布 均值 $\mu=0.2$
$uexp(0.5)$	元组分值服从均匀分布; 概率服从指数分布 均值 $\mu=0.5$

我们采用基于 Hadoop(v0.21) 的 PC 集群实验环境。系统由 6 个节点构成,包含 1 个 JobTracker 节点和 5 个 TaskTracker 节点。节点为清华同方超翔 Z900 计算机, CPU 为 Inter Core i5-2300 2.80GHz, 100MHz 外频, 28X 倍频, 内存 8GB, 硬盘 1TB, 千兆网卡。编程语言为 Java。

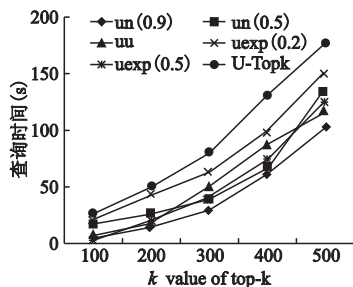


图 3 不同概率分布下 EU-TopK 查询时间随 k 的变化以及和 U-TopK 对比

Fig. 3 Query time of different k value and probability distributions

图 3 展示了不确定性元组分别按照表 1 的不同分布状态

下,查询时间随着 k 值的变化情况(该图纵坐标表示查询时间,横坐标表示参数 k)。从图 3 不难看出,控制元组分值均服从均匀分布,当元组的概率服从 $un(0.9)$ 时,查询时间最小;当元组的概率服从 $uexp(0.2)$ 时,查询时间最长。同概率不同分布下 EU-TopK 算法扫描深度随 k 的变化的分析一样 $uexp(0.2)$ 分布状态下,EU-TopK 算法的优化终止条件最难满足,所以花费的查询时间最久,而 $un(0.9)$ 分布状态下算法的终止条件较易满足,从而查询时间最短。事实上,扫描深度越大,查询时间越长。由于 U-Topk 的查询时间取决于数据量和 k 的个数,与概率分布无关,因此实验选取了 EU-Topk 性能最低的 $uexp(0.2)$ 数据集,采用 U-Topk 算法完成不确定查询,从实验结果对比可知,EU-Topk 在最坏情况下比 U-Topk 查询性能平均 20.8%,优化效果明显。

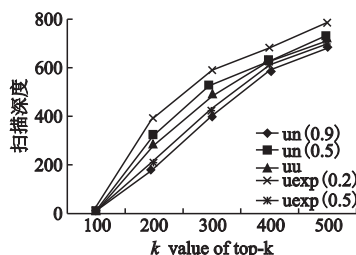


图 4 可信度不同分布下 EU-TopK 算法扫描深度随 k 的变化

Fig. 4 Scan depths of different k value under several confidence degrees

图 4 表示了不确定性元组分别按照表 1 的不同分布状态下,扫描深度随着 k 值的变化情况(该图纵坐标表示扫描深度,横坐标表示参数 k)。从图 4 可以看出,控制元组分值均服从均匀分布,当元组的概率服从 $un(0.9)$ 时,扫描深度最小;当元组的概率服从 $uexp(0.2)$ 时,EU-TopK 算法扫描深度最大。然而,根据前文的分析,U-TopK 算法采用队列这一数据结构,并没有扫描深度的概念,U-TopK 需要扫描所有可能世界实例,可能世界实例的个数与元组的概率分布无关,而 EU-TopK 算法则无需扫描所有的可能世界实例,扫描深度与概率分布有关,因此 EU-TopK 的扫描算法要优于 U-TopK 扫描性能得到明显的优化。

从 EU-TopK 算法的终止条件,即在元组向量 R 中选择 $P(t)$ 值最大的元组集合,优先构造包含他们的可能世界,那么该可能世界树形结构的概率 p 的值越大,就越容易满足算法的终止条件,访问的元组就越少。实验数据中,当元组的概率服从指数分布且 $\mu=0.2$ 时,具有比较高概率值的元组数量很少,则该树形结构的概率 p 很小,那么就需要构造更多的树形结构才能够查找出答案。另一方面,当元组概率值服从正态分布且 $\mu=0.9$ 时,很大部分元组具有大值,那么相应的优先构造的可能世界树形结构概率 p 越大,越可能较早满足 EU-TopK 算法终止条件,相应的扫描深度也最小。

7 结论和进一步工作

本文研究了在大数据环境下的不确定性数据查询算法,并着重考虑了 Top-K 查询、MapReduce 编程模型和键值对

(Key-Value) 数据模型. 本文的主要成果如下:

① 提出不确定性键值对数据模型 KVP(Key-Value-Pos-sibility) ,并进一步分析了可能世界语义下的 KVP 模型 ,此模型更适合应对海量分布式不确定性数据的查询处理;

② 提出 EU-TopK 算法 ,在 U-TopK 算法语义的基础上通过建立可能世界空间树形结构、确定终止条件等方法对其进行优化;

③ 基于 MapReduce 实现 EU-TopK 算法 ,利用 MapReduce 编程模型对不符合用户查询范围或明显不合理的数据进行选择运算 ,使得在建立可能世界模型时的效率提升.

本文通过算法的复杂度分析以及实现评估 ,验证了 U-TopK 算法较原有 U-TopK 算法确切的性能提升 ,且能够适用于不同的数据分布 .进一步的研究工作包括进一步完善问本文提出的查询算法的可能世界树形结构 ,以及研究适用于更多不确定性查询算法的数据模型或索引结构.

References:

- [1] Zhou Ao-ying ,Jin Che-qing. A survey on the management of uncertain data[J]. Chinese Journal of Computers 2009 ,32(1) : 2-3.
- [2] Jiang Tao ,Zhou Ao-ying ,Gao Yun-jun. Query processing on uncertain data [EB/OL]. Science Paper Online. [http://www. paper. edu. cn/releasepaper/content/201209-307](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201209-307) 2014.
- [3] Soliman M A ,Ilyas I F ,Chen-Chuan Chang K. Top-k query processing in uncertain databases [C]. Data Engineering ,ICDE 2007 , IEEE 23rd International Conference on ,IEEE 2007: 896-905.
- [4] Zhou Fan ,Li Shu-quan ,Xiao Chun-jing ,et al. Probabilistic top-k and ranking query algorithms in uncertain data bases [J]. Journal of Computer Applications 2010 ,30(10) : 2605-2609.
- [5] Sarma A D ,Benjelloun O ,Halevy A ,et al. Working models for uncertain data [C]. Data Engineering 2006. ICDE'06 ,Proceedings of the 22nd International Conference on. IEEE 2006: 7-18.
- [6] Cheng R ,Kalashnikov D V ,Prabhakar S. Evaluating probabilistic queries over imprecise data [C]. Proceedings of the 2003 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data ,ACM , 2003: 551-562.
- [7] Pei J ,Jiang B ,Lin X ,et al. Probabilistic skylines on uncertain data [C]. Proceedings of the 33rd International Conference on Very Large Data Bases ,VLDB Endowment 2007: 15-26.
- [8] Hua M ,Pei J ,Zhang W ,et al. Ranking queries on uncertain data: a probabilistic threshold approach [C]. Proceedings of the 2008 ACM SIGMOD International Conference on Management of data ,2008: 673-686.
- [9] Cormode G ,Li F ,Yi K. Semantics of ranking queries for probabilistic data and expected ranks [C]. Data Engineering 2009 ,ICDE'09. IEEE 25th International Conference on. IEEE 2009: 305-316.
- [10] Meng Xiang-fu ,Ma Zong-min ,Yan Li ,et al. A knowledge-based approach to fuzzy querying over relational data base [J]. Journal of Northeastern University 2009 ,30(3) : 349-351.
- [11] Li Wen-feng ,Peng Zhi-yong ,Li De-yi ,et al. Top-k query processing techniques on uncertain data [J]. Journal of Software 2012 ,23(6) : 1542-1560.

附中文参考文献:

- [1] 周傲英 ,金澈清. 不确定性数据管理技术研究综述 [J]. 计算机学报 2009 ,32(1) : 2-3.
- [2] 蒋 涛 ,周傲英 ,高云君. 不确定数据查询处理 [EB/OL]. 中国科技论文在线. [http://www. paper. edu. cn/releasepaper/content/201209-307](http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201209-307) 2012-09-26 2014.
- [4] 周 帆 ,李树全 ,肖春静 ,等. 不确定数据库中概率 top-k 和排序查询算法 [J]. 计算机应用 2010 ,30(10) : 2605-2609.
- [10] 孟祥福 ,马宗民 ,严 丽 ,等. 一种基于知识的关系数据库模糊查询方法 [J]. 东北大学学报 2009 ,30(3) : 349-351.
- [11] 李文凤 ,彭智勇 ,李德毅 ,等. 不确定性 Top-K 查询处理 [J]. 软件学报 2012 ,23(6) : 1542-1560.