

doi:10.3772/j.issn.2095-915x.2015.06.017

面向大数据的图数据处理技术

罗征¹, 王赛¹, 张帆¹, 孙泰²

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院 北京 100083; 2. 全国组织机构代码管理中心 北京 100029)

摘要: 大数据时代, 数据规模爆炸性增长, 传统的数据处理技术已无法满足需求。“图”这一抽象数据能够充分表示数据间的关系。现实世界中的许多应用场景可以用图结构来表示。文中结合大数据的特点, 从图数据管理与图数据处理机制两个方面, 综述了大数据背景下图数据处理的关键问题。总结了当前的研究现状和进展, 分析了存在的挑战性问题, 并深入探讨了未来的研究方向。

关键词: 大数据, 图数据模型, 图处理, 数据管理

Graph Data Processing on Big Data

LUO Zheng¹, WANG Sai¹, ZHANG Fan¹, SUN Tai²

(1.School of Mechanical Electronic & Information Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

2.National Administration for Code Allocation to Organizations, Beijing 100029, China)

Abstract: In the era of Big Data, traditional data processing have been unable to meet demand with the explosive growth of data scale. The abstract data structure “graph” is well-suited to model the association of data. Many application scenes of real world can be represented by graph structure. This paper surveys the key issues of graph data processing from the aspects of graph management and graph data processing mechanisms; summarizes the state of current research works completely; analyzes the exiting challenge problems; and deeply explores the research directions in future.

Key words: Big data, graph data model, graph processing, data management

基金支持: 国家科技支撑计划项目(2013BAK07B02), 国质检科技计划资助(2014QK111)。

1 引言

近年来,大数据成为计算机行业乃至科技界关注的热点。著名管理咨询公司麦肯锡称“数据已经渗透到当今每一个行业和业务职能领域,成为重要的生产因素,人们对于大数据的挖掘和运用,预示着新一波生产力增长和消费盈余浪潮的到来”,“大数据时代”已然来临。相较于传统意义上的数据,大数据的特征总结为5个V,即体量大(volume)、速度快(velocity)、模态多(variety)、难辨识(veracity)和价值大密度低(value)。但大数据的主要难点并不在于数据量大,因为通过对计算机系统的扩展可以在一定程度上缓解数据量大带来的挑战。大数据真正难以对付的挑战来自于数据类型多样(variety),即数据异构。因为数据类型多样使得一个应用既要处理结构化数据,同时还要处理视频、文本、语音等非结构化数据,这对现有的关系型数据库系统来说难以应付。

2 图数据处理优势

图是计算机科学中最常用的一类抽象数据结构,由于自身的结构特征,可以很好地表示事物之间的关系,是一种重要的大数据描述方式。现实世界中存在着很多数据元素且关联性强的场景,知识库网络、社交网络、地理交通网络、学术网络等都可以用图数据描述^[1]。以微博为例,可以用虚拟ID作为点,ID间互相的“关注”、“点赞”、“回复”等关系作为边来构建图数据结构。当数据容量小的时候,关系型数据库凭借其操作方便的优势广泛应用。但随着大数据的到来,在2014年12月里微博的月活跃用户为1.5亿,用户间关注的关系超过十亿。这样大规模的数据,关系型数据库的低扩展性与低效性成为限制数据处理的关键瓶颈。而图数据库凭借其应用图形理论存储实体关系的特性突破了这个瓶颈,并在各个

领域得到了广泛的应用,如计算机领域、自然科学领域以及交通领域。互联网领域以社交网络(如Facebook、微博)最具代表性,通过以人与人的关系为基础构建的图建立了大量的在线社会网络关系,基于此可以研究社会群体关系、区域社区发现等问题。交通领域的应用,以道路、地理、场所为实体构建的图可用于最短路径查询、邮路规划,动态交通等问题。图数据虽然结构复杂,处理困难,但是它有很好的表现力,因此得到了各领域的广泛应用,随着图数据处理中所面临的各种挑战被不断地解决,图数据处理将有更好的应用前景。

3 图数据处理问题

在现在的数据应用系统中,图数据处理系统需要对大规模数据进行一系列的操作,包括图数据的存储、图查询、最短路径查询、图模式挖掘以及图数据的分类、聚类等。^[2]图数据具有计算的强耦合特性,在图中,数据之间是相互关联的,因此,对图数据的计算处理也是相互关联的。然而各种大规模异构数据的爆发性增长带来节点和边数的增多,图数据处理的复杂性结合这种数据耦合的特性给图处理系统提出了严峻的挑战。以社交网络影响最大传播模型为例,信息传播范围的大小与传播网络中具有影响力的节点有关,找出最具有影响力的 k 个节点,使得最终社交网络中被影响的节点最多,则信息传播范围最大。将 k 个节点用图顶点表示,节点间的关系用有向边表示,按邻接表形式存储 k 个图顶点与 e 条边。在目前社交网络的规模下,整个图的数据规模将相当巨大,如此大规模的图,对其存储、查找、更新等处理的时间开销和空间开销大大超出了当前图处理系统的处理能力。面对大数据环境下针对图数据的高效处理,已经成为当前研究急需解决的问题。

4 关键技术挑战

目前大规模图数据处理只是一个通用的处理框架，而且其本身也正处于发展阶段，如何在大数据环境下进行大规模图数据处理，仍有很多关键技术难题需要解决。图计算及其分布式并行处理通常涉及复杂的处理过程，需要大量的迭代和数据通信，联机事务处理，导致传统技术很难直接应用到图数据处理中。本文结合大数据的特点，从图数据管理与图数据处理机制两个方面，综述了大数据背景下图数据处理的关键技术挑战。

4.1 图数据存储

在目前的大规模图数据存储系统中，主要采用超图和简单图两种数据模型。这两种模型都可以处理图中的有向图和无向图，默认情况是有向图，而无向图中的边也看作是两条有向边，即有向图的一种。超图模型的基本数据单元由类和对象元素以及二者的属性、关系组成。类是表示对具有相同性质的对象的定义。对象元素和对象元素属性表示类的组成、性质。在超图数据模型中，类之间和类对象元素之间可有多种关系，这种关系可是层次性的，也可非层次性的^[3]。超图类之间的层次关系表示了超图类的纵向关系，展现了面向对象模型的类继承、联合和多态等特性。超图模型的非层次关系则表示了空间超图类的全方位横向关系，正是这种关系构建了复杂空间分

析和大规模分布式计算的基础。简单图模型的基本元素是点与边，一条边对应两个点。其常用存储结构包括邻接表、邻接矩阵、十字链表和邻接多重表等多种方式。从大规模图处理的现实需求和维护复杂度考虑，邻接矩阵和邻接表是最常用的两种结构。采用邻接矩阵表示图的拓扑结构，简洁直观，便于快速查找各个顶点之间的关系，但是邻接矩阵的存储代价高昂，面对大规模图数据，该问题更为严重。与邻接矩阵相比，邻接表的应用范围更加广泛。像网页搜索的 PageRank 计算、最短路径计算等应用，不需要频繁查找图顶点之间的连通性，这时邻接表完全可以满足计算需求。邻接表的存储开销小，便于分割处理，是一种理想的图组织方式，Hama、Pregel 和 HaLoop 等系统均采用邻接表的形式组织图数据。

大规模图数据存储应用最广泛的是 Key-Value 存储模型、文档存储模型、列族存储模型、图形数据存储。Key-Value 存储模型的存储模式逻辑简单，在面对大规模和高并发类型的应用场景以及大量非结构化内容信息时，非常适合通过主键进行查询或遍历，因此具有广泛应用。但对复杂的条件查询时支持度不佳。该模型的典型系统有 RaptorDB 和 SimpleDB。从图处理效率的角度出发，像 PageRank 计算等，并不需要复杂查询，Key-Value 模型完全可以胜任。若图数据采用邻接表表示，则图的源顶点作为 Key，源顶点值、出边及边信息将作为 Value，如下图 1 所示。

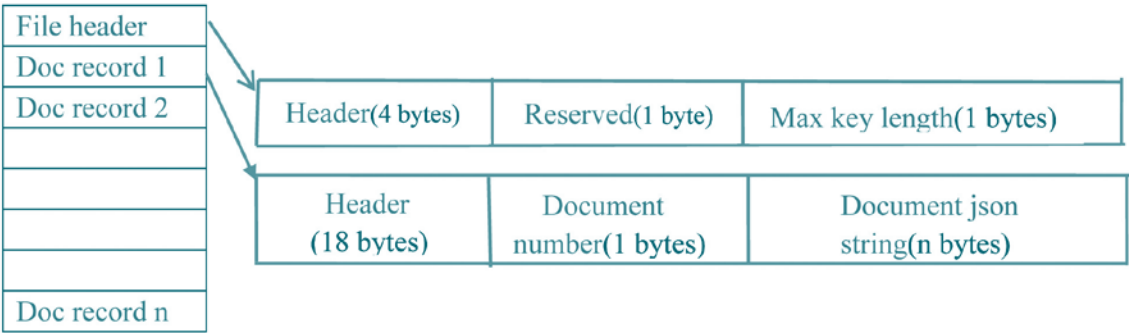


图 1 基于 Key-Value 存储模型的 RaptorDB 系统模型

文档存储模型具有较为灵活的存储格式，没有强制的架构。其以封包键值对的方式进行存储，通过对封包采取一些约定，将不同的文档划分成不同的集合，以管理数据。适合存储系统日志，文献知识等结构化数据，与 Key-Value 存储不同的是，文档存储着重于内部结构。^[4]这使得存储引擎可以直接支持二级索引，从而可以对任意字段进行高效查询。CouchDB 和 MongoDB 是采用这种存储模型的典型系统。但是由于其架构的多样性，文档存储模型不太适合以邻接矩阵或邻接表组织的图数据。列族存储模型比较适合对某一列进行随机查询处理，其以流的方式在列中存储所有的数据。对于任何记录，索引都可以快速地获取列上的数据。但是对于穷举式遍历，反而不如传统的面向行的存储模式。采用该存储模型的典型系统有 BigTable、Hbase、Cassandra 等。图形数据库存储顶点和边的信息，有的支持添加注释。图形数据库可用于对事物建模，如社交图谱、真实世界的各种对象。图形数据库的查询语言一般用于查找图形中断点的路径，或端点之间路径的属性。Neo4j 是一个典型的图形数据库。文献^[5]从管理数据的规模和模型的复杂性两个维度比较了这 4 种基本存储模型，如下图 2 所示。

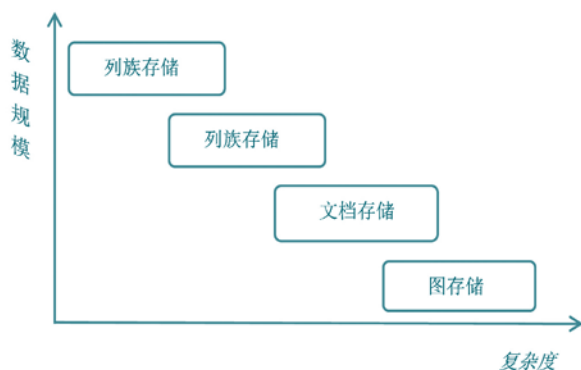


图 2 4 种主要存储模型比较

4.2 图数据索引

索引是传统关系数据库中的关键技术，是对数据库表中一列或多列的值进行排序的一种结

构，从而可快速访问数据库表中的特定信息。面对海量的数据规模，分布式处理机制是当前主流的应对模式，通过统一管理协调以完成大规模信息处理任务。但在面对查询结果的数据量小于原始数据时，会遍历很多无用的子图数据，大大影响了处理效率，因此建立合适的索引可以有效的提高当前分布式计算的处理能力。当前的主流索引方式（如 B+ 树索引、Hash 索引、位图索引）在面对大规模图数据时，由于其索引结构的单一性，是无法承载大批量的数据查询、更新等操作。因此图数据索引成为当前图数据处理的热点，不断有新的思路与模型提出。文献^[2]提出了二级索引结构，即在每个数据分支上建立本体的 B+ 树索引分支，再通过计算节点的 Overlay 机制构造全局索引。在面对大规模数据查询处理时具有较强的灵活性。文献^[6]利用 R 树空间分割的理念，结合串行通信协议思想，建立了多维度的索引机制 RT-CAN。这种多维度的特性较适用于非结构化图数据处理。文献^[7]则在 k-d 树层次划分与特征点匹配的理念基础上提出了分布式 k-d 树的思想，充分结合了分布式处理的思想，在范围查询与看最近邻查询等应用上有突出的高效性。文献^[8]将 R 树与 k-d 树结合起来构建数据结构，提出面向云计算的多维索引，具有较为可观的发展前景。

综合上述的索引结构，我们可根据其层次结构与使用目的分为两类：一类是结合当前较为热门的云计算，通过在云平台上构建分布式索引，加快数据计算，提高对子图数据的查询效率，主要适用于分布式图数据库。另一种则是通过数据库本身结构利用数据本身的特性建立索引，提高数据匹配度，从而提高图的计算处理效率。目前很多发展完善的图数据库都兼备两类索引，以目前广泛应用的 NOSQL 图形数据库 Neo4j 为例，其本身就构建了带有树形结构索引的数据库，以提高查询匹配效率。又在匹配计算中嵌入了 Lucene 索引，大大提

高了全文查询效率以及数据处理能力。数据库本身就是一个树形结构的索引,可用于提高查询效率,此外,还可以使用独立的 Lucene 索引,提供全文索引和索引命中率排序功能。

4.3 图数据分割

在大数据环境下,一个大规模图将具有数亿个节点,附加属性信息,图的存储规模将十分庞大,从而必须进行分布式并行处理。并且图数据处理中大多采用并行式计算框架,这对图节点通信要求较高,良好的图数据分割将大大缩小节点通信对处理效率的影响。由于图数据的耦合性,图处理的并行算法对内存的访问表现出很低的局部性。因此大图分割并取得较好的分割效果,是一项巨大的挑战。目前普遍为大家所认可的方案有:文献^[9]采用随机森林(SF)方法,进行图分割,它利用多个分类树对数据进行判别与分割,同时给出各个变量(基因)的重要性评分,评估各个变量在分割中所起的作用。文献^[10]采用 Hadoop 中的 MapReduce 编程模型,在使用 Hadoop 进行图的迭代处理时,通过设置 Partitioner 函数,使其能根据图的迭代处理结果不断调整图的结构,再将 Reduce 任务处理的图数据视为一个子图,通过 Map 阶段和 Reduce 阶段的 Shuffle 处理,使连通性较强的图顶点分布到同一个 Reduce 任务并存储为一个单

独的文件,在下一个 Map 阶段中加以利用,以减少通信量。文献^[11]通过 3 步处理来实现大规模图的分割:(1)建立带权重的深度优先搜索树;(2)将大图分割成若干个均衡的子图;(3)迭代处理,尽量减少子图之间的关联。

无论哪一种方案都要遵循以下两个原则:(1)子图关联性,即提高子图内部关联性,降低外部关联性,降低节点通信代价。在进行图遍历时,如果遍历的目标不在同一台机器,则此次遍历将产生通信花销,内存访问的时间是纳秒级的,而网络通信则是毫秒级的。二者相差巨大。因此要尽量避免相联子图间的数据访问,节约了通信时间成本,从而提高了图处理的速度。子图均衡性,即子图要做到数据均衡化,避免出现“水桶效应”(速度快先完成的任务等待速度慢的任务)。为充分利用一台计算机的计算性能,最好的方法当然是将数据都放在其内部,这样就避免了网络通信损耗,但是这样就未能利用计算集群的优势。因此每个子图都存储差不多数量级的数据,以完成相似数量级的计算,这样就兼顾了存储容量与计算性能的负载均衡。图 3 对比了 3 种不同的图分割效果,其中图 3(a)单纯考虑了子图的数据均衡性,图 3(b)单纯考虑了子图的连通性,这两者效果均不理想,而图 3(c)同时考虑了这两个元素,则显著的提高了分布式处理效率^[12]。

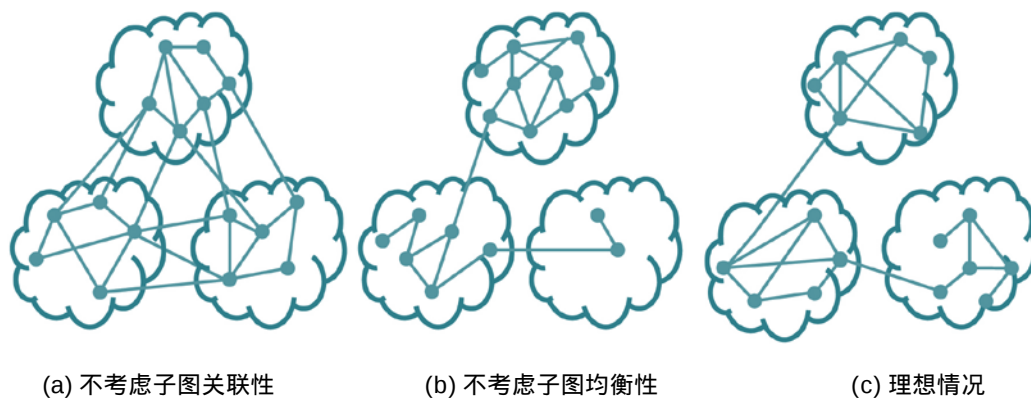


图 3 3 种分割方式

5 总结

伴随移动互联网的蓬勃发展,大数据的研究也日益多样化,图凭借其对于现实生活现象极具现实性的描述,具有更广泛、更高效、更有前景的应用。图数据处理技术作为其关键的一环,更是成为大规模数据处理中的研究重点。图数据存储、图数据索引、图数据分割作为图数据处理的基础,对于提高图计算效率更是重中之重。本文结合目前的研究成果及处理思路,总结了大图条件下数

据处理的关键三环及其最新的研究成果。当然仍存在着亟待解决的问题,当前图数据存储的灵活性与扩展性一直限制着图数据的导入导出图数据存储。^[13] 尽管通过索引结构解决了分布式并行处理的效率问题,但其随着索引结构本身规模的复杂化,规模化,涉及到其本身的管理机制还不够完善。而面对着数据的多样化和虚拟化,现有的图分割技术面对连通性、均衡性的要求越来越难以满足。

参考文献

- [1] 王海勋,图数据的管理与挖掘[M],中国计算机学会通讯.2012-10-1.
- [2] LUM S A,GREGOR D,HENDRICKSON B ,et al.Parallel Processing Letter[J]. Parallel Processing Letters ,2007 ,17(1):5-20.
- [3] ANGLES R,GUTIERREZ C.Survey of graph database models[J].ACM Computing Surveys , 2008 , 40(1):1-39.
- [4] BRIN S,PAGE L. The anatomy of a large-scale hypertextual web search engine[J].Computer Networks and ISDN Systems.1998;30(1-7):107-117.
- [5] Eifrem Emil . NOSQL:Scaling to size and scaling to complexity; <http://blogs. Neotechnology.com /emil /2009 /11 /nosql scaling to size and scaling to complexity.> , 2009-1-15.
- [6] WANG J B,WU S,GAO H. Indexing multidimensional data in a cloud system // Proceeding of the SIGMOD[C].Indianapolis ;Indiana, USA , 2010 :591-602.
- [7] TSATSANIFOS G,SACHARIDIS D,SELLIS T et al. MIDAS:Multi-tribute indexing for distributed architecture systems //Proceedings of the SS TD[C].MN,USA , 2011 :168-185.
- [8] ZHANG X Y,AI W,WANG Z Y,et al.An efficient multidimensional index for cloud data management[M] //Proceedings of the CloudDB. Hong Kong ,China , 2009 :17-24.
- [9] METIVIER Y,ROBSON J,MAHER N. About randomised distributed graph colouring and graph partition algorithms[J]. Information and Computation ,2010 ,208(11):1296-1304.
- [10] DITTRICH J,QUIANE R,JINDAL A et al. Hadoop ++:Making a yellow elephant run like a Cheetah(without it even noticing)[M] //Proceedings of the VLDB.Singapore, 2010 , 3 :515-529.
- [11] SOUSSI R,AUFAURE M,BAAZAOU H. Graph database for Collaborative Communities[M]//Pardede Ericed.Community-Built Databases :Research and Development ,Berlin , Heidelberg :Springer , 2011 :205-234.
- [12] ANGLES R,GUTIERREZ C. Survey of graph database models[J].ACM Computing Surveys , 2008 , 40(1):1-39.
- [13] Infinite Graph; the Distributed Graph Database. <http://www.Infinite graph. com/>, 2011-7-29.

《情报工程》征稿启事

《情报工程》期刊是由中国科学技术协会主管，中国科学技术情报学会与中国科学技术信息研究所主办的专业性学术刊物。该刊国际标准连续出版物号：ISSN 2095-915X，国内统一连续出版物号 CN 10-1263/G3。办刊目标是在情报分析领域中的理论研究、技术方法、工程应用、政府和企业实践等方面，提供一个专业的学术交流平台。

《情报工程》期刊目前已被数字化期刊全文数据库（万方）、中文科技期刊数据库（维普网）、Google 学术搜索收录。

期刊关注的主题主要包括：

前沿情报理论方法、竞争情报、创新管理、投资战略、技术转移、政府和企业应用案例研究、信息分析处理技术、决策支持理论与技术、国内外情报机构和智库动态、政府和企业的情报应用实践、图书馆情报理论与技术等。

约稿内容要求：

稿件符合我刊办刊主题；

稿件主题鲜明、数据可靠、文字通顺、符合学术规范；

稿件要求包含学术论文的基本要件：标题（中英文）、作者姓名（中英文）、作者单位（中英文）、地址及邮编（中英文）、摘要（中英文）、关键词（中英文）、中图分类号、正文、参考文献、基金信息和作者简介与联系方式。稿件模版下载地址：http://tie.istic.ac.cn/ch/first_menu.aspx?parent_id=20150331023349001；

来稿请用简化汉字，录稿用 Word 软件、五号宋体字、1.5 倍行距、图表规范与文字相对应、图内文字清晰；

来稿后编辑部将在一个月内反馈审稿意见，若未接收到稿件处理通知可向编辑部查询，修改稿逾一个月未返回且不作说明，视为自动撤稿；

请在来稿末尾附上作者详细通讯地址。包括作者所在省、市、区、街道名称、邮政编码、联系电话、电子信箱以及本人要求等，务必准确；

来稿一经采用，版权即归本刊编辑部，编辑部将发出《稿件录用通知》并在出看后赠送当期刊物一本；

请勿一稿多投。

投稿方式：

请直接通过 <http://tie.istic.ac.cn> 投稿。

本刊既厚名家、更重新人。欢迎国内外作者赐稿！

《情报工程》编辑部