

图数据库概览

赵婉羽

201800301061

摘 要

图数据库是 NoSQL 数据库的一种，它应用图形理论存储实体之间的关系信息，旨在解决关系数据库的局限性。由于其广泛的应用场景和对复杂关系运算的支持，图数据库无疑是近年来成长最快的数据库类型。随着图数据库领域的快速发展，其分类和属性等却没有统一的说法。本文的目的是提供图数据库领域的一个概览，综合现阶段学术和工业界的主流观点，对图数据库的基本概念、发展进程、数据模型、重要属性、应用领域和面临的挑战等进行简要介绍。文中还对比了几种不同类型的数据库，给出了一个著名图数据库产品的列表。

关键词：图数据库；图模型；NoSQL

1 引言

在计算机科学中，**图数据库**（graph database，GDB^[1]）是一种使用图结构进行语义查询的数据库，它使用节点（nodes）、边（edges）（也称为图（graphs）或关系（relationships））和属性（properties）来表示和存储数据。系统的关键概念是图（graph）。图直接将存储中的数据项与数据节点和节点间表示关系的边的集合相关联。关系可以直接将存储区中的数据连接在一起，并在许多情况下，可通过一个操作进行检索。图形数据库将数据之间的关系作为优先级。由于图数据库中的关系永久存储在数据库本机中，因此对其进行查询很快。图数据库可以直观地显示关系，对于高度互连的数据非常有用。^[2]

图数据库是一种 NoSQL，用以解决现有关系数据库的局限性。图模型明确地列出了数据节点之间的依赖关系，而关系模型和其他 NoSQL 数据库模型通过隐式连接来连接数据。换句话说，关系是图数据库中的一等公民，可以被标记、定向和给定属性。这与关系方法暗示关系且必须在运行时对其进行修正形成对比。图数据库与 20 世纪 70 年代的网络模型数据库相似，它们都表示一般的图，但网络模型数据库在较低的抽象层次^[3]上运行，并且不能轻松遍历一系列边。^[4]

图数据库的底层存储机制可能各有不同。可分为为了存储和管理图而专门设计的原生数据库和在现有存储（文档存储、基于表的存储、RDF 存储等）之上配有图语义层的多模数据库。^[5]

从图数据库中检索数据需要 SQL 之外的查询语言，SQL 是为了处理关系系统中的数据而设计的，因此无法“优雅地”处理图的遍历。截至 2017 年，没有一个像 SQL 一样通用的图查询语言，有很多系统都是仅限于一个产品。不过，现在已经有了一些标准化的工作，产生了像 Gremlin、SPARQL 和 Cypher 这样的多供应商查询语言。除了查询语言接口外，还可以通过应用程序接口（API）访问一些图形数据库。

图数据库与图计算引擎不同。图数据库是关系联机事务处理（OLTP）数据库的一种转换。而图计算引擎在联机分析处理（OLAP）中用于批量分析。

由于主要技术公司在使用专有图数据库方面的成功以及开源图数据库的引入，^[6] 图数据库在 2000 年代引起了相当大的关注。

2 发展

2.1 历史

1960 年代中期，IBM 的 IMS 等导航数据库在其分层模型中支持树状结构，但严格的树状结构可以通过虚拟记录来规避。^{[7][8]}

从 1960 年代末开始，图结构可以在网络模型数据库中表示。CODASYL 于 1959 年定义了 COBOL，1969 年定义了网络数据库语言。

从 1980 年代中期开始，标定图可以在图形数据库中表示，如逻辑数据模型。^{[3][9]}

1990 年代初期，图数据库出现了一些改进，并在 90 年代后期加速了对网页的索引工作。

2000 年代中后期，可以使用具有 ACID 保证的商业图数据库，如 Neo4j 和 Oracle Spatial and Graph。

2010 年代，可横向扩展的商业 ACID 图形数据开始可用。此外，SAP HANA 在图数据库中引入了内存（in-memory）和列式（columnar）技术。^[10] 同时，支持图形模型（以及关系数据库、面向文档的数据库等其他模型）的多模型数据库也已可用，如 OrientDB，ArangoDB 和 MarkLogic（从 7.0 版本开始）。在这段时间里，随着社交媒体公司的出现，各种类型的图数据库在社交网络分析中变得非常流行。

2.2 现状

大数据时代的业务增长带来了两个明显的变化：数据量的剧增和数据关联的复杂化。与此同时，用户对于数据价值的期望越来越高，这些变化催生了数据库的变革和创新。图数据库由于提供了对关联数据最直接的表达，以及图模型对异构数据天然的包容力，使得图数据库迎来飞速发展的状态。^[11]

DB-Engines.com 上的数据显示（图 1），图数据库是近年来成长最快的数据库类别。2013 年至 2020 年，其流行度增长了约十倍。^[12]

2019 年年初，Gartner 数据与分析峰会上将图列为 2019 年十大数据和分析趋势之一，并预计到 2022 年，全球图处理及图数据的应用将以每年 100% 的速度迅猛增长，2020 年保守估计将达到 80 亿美元。市场尚处于蓝海，竞争却遍布全球。

在国内，越来越多的公司也开始进入图数据库领域，针对内部的产品开发相应的图数据库系统，但这种图数据库的应用针对性较强，所以并不适用于市场上其他客户。

目前在图数据库领域，远没有达到传统 RDBMS 的成熟程度。图数据库与云计算结合是必然趋势，原生、并行是核心技术优势。^[11]

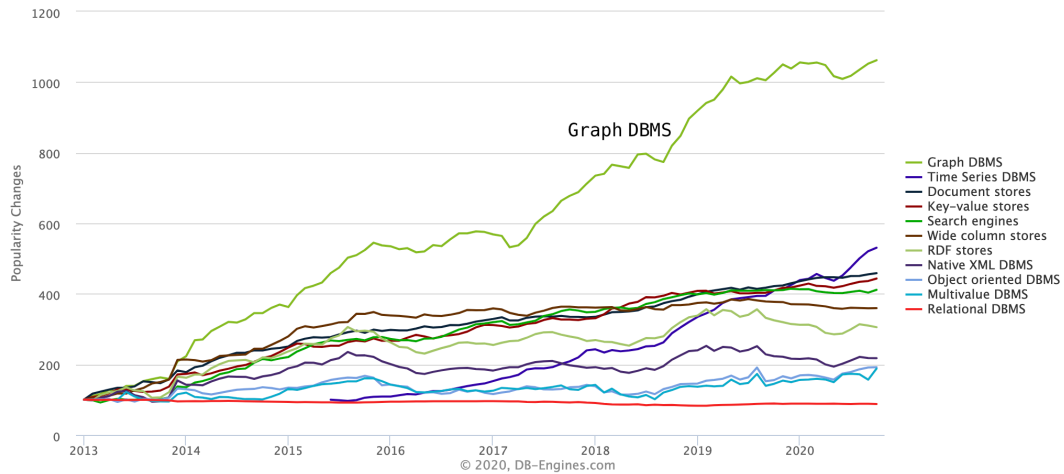


图 1: 各类别数据库受欢迎程度的历史趋势

3 图模型

3.1 带标签的属性图

带标签的属性图（Labeled-property graph）模型由一组节点、关系、属性和标签表示。数据节点及其关系都被命名，并且可以存储由键/值对表示的属性。可以对标记节点进行分组。表示关系的边具有两种性质：始终有起点和终点，并且是有向的；^[13] 因此属性图是有向图。关系也可以具有属性。这在为节点的关系提供其他元数据和语义时很有用。^[14] 关系的直接存储允许进行恒定时间遍历。^[15]

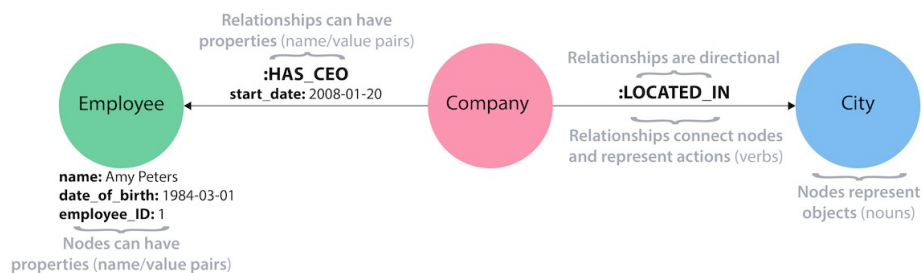


图 2: 属性图模型的组成部分

3.2 资源描述框架

在资源描述框架（Resource description framework, RDF）图模型中，每个信息的添加由一个单独的节点表示。例如，设想一个场景，用户必须为图中表示为一个不同节点的人添加一个名称属性。在带标签的属性图模型中，可以通过在人的节点中添加 **name** 属性来完成。但在 RDF 中，用户必须添加一个连接到初始人节点的 **hasName** 单独节点。具体而言，RDF 图模型由节点和弧组成。RDF 图形表示法或语句由以下各项表示：主语的节点，宾语的节点和谓语的弧。节

点可以为空白，文字和/或由 URI 标识。弧也可以由 URI 标识。节点的文字有两种可能的类型：普通（无类型）和有类型。普通文字具有词汇形式和可选的语言标记。有类型文字是由带有 URI 的字符串组成的，该 URI 标识特定的数据类型。当数据不具有 URI 时，可以使用空白节点来准确说明数据的状态。^[16]

RDF 被用在 Facebook 的 Open Graph 协议中以“允许任何网页具有与 Facebook 上任何其他对象相同的功能”^[17]，也在语义网中使用。

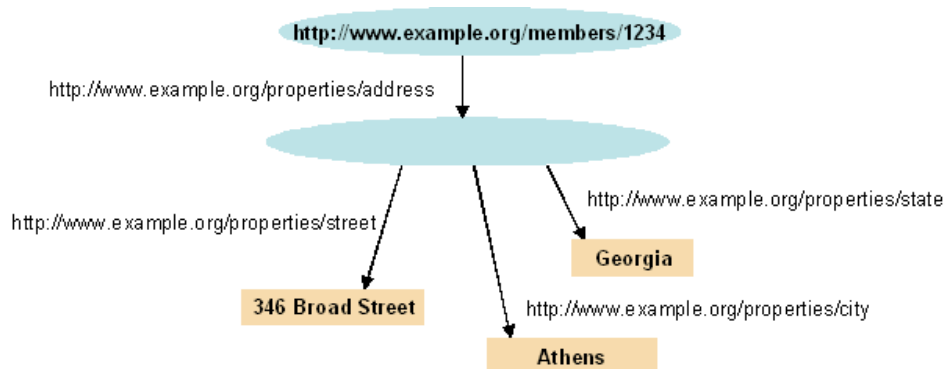


图 3: 一个 RDF 图例

3.3 超图

不同于属性图和 RDF，超图（hypergraph）的边可以连接任意数量（不能为 0）的节点，超图的边又称为超边（hyperedges）。图 4 是一个典型的超图。

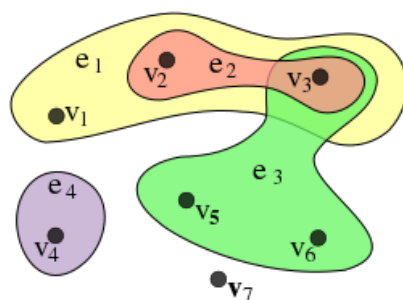


图 4: 一个阶数为 7，大小为 4 的超图

4 重要属性

图形数据库是用于类图查询的强大工具。例如，计算图中两个节点之间的最短路径。可以以自然的方式在图形数据库上执行其他的类图查询（例如图形的直径计算和社区检测）。

图是灵活的，用户可以在不损失应用程序功能的情况下将新数据插入现有图。数据库的设计人员无需计划数据库未来用例的大量细节。

4.1 存储

原生数据库 (Native graph database) 从底层开始设计以存储实体及其关系, 考虑了图数据的特性, 从而加快在线深层图形的导航和计算。^[5]

多模数据库 (Multi-mode graph database) 将图序列化, 然后存储到其他数据库中。有些依赖于关系引擎并将图数据“存储”到表中 (虽然表是一个逻辑元素, 但是这种方法在图数据库、图数据库管理系统和实际存储数据的物理设备之间施加了另一层抽象)。另一些则使用键值存储或面向文档的数据库进行存储, 使它们具有固有的 NoSQL 结构。多模图数据库仅提供导航图形的能力, 但由于其通用的存储层, 在多跳导航 (multi-hop navigation) 中的表现较差。^[5]

4.2 无索引邻接

数据查找性能取决于从一个特定节点到另一节点的访问速度。由于无索引的邻接关系会强制节点具有直接的物理 RAM 地址并物理上指向其他相邻节点, 因此可以实现快速检索。具有无索引邻接关系的原生图系统不必遍历任何其他类型的数据结构即可找到节点之间的连接。一旦检索到节点中的一个, 就将图形中直接相关的节点存储在高速缓存中, 这使得数据查找的速度甚至比用户第一次获取节点的速度还要快。然而, 这种优势是有代价的。无索引邻接牺牲了不使用图遍历带来的查询效率。原生图数据库使用无索引邻接来处理对所存数据上的增、删、改、查 (CRUD) 操作。

4.3 图形类型

可以对多种类型的图分类。Gartner 提出了五大类图表:^[18] 社交图 (Social graph) 是关于人与人之间的联系; 例如 Facebook、Twitter 和六度分隔思想。

意图图 (Intent graph) 涉及推理和动机。

消费图 (Consumption graph) 也称为“支付图”, 消费图在零售行业中被大量使用。Amazon、eBay 和 Walmart 等电子商务公司使用消费图来跟踪个人客户的消费。

兴趣图 (Interest graph) 描绘一个人的兴趣, 通常由社交图来补充。它有可能通过按兴趣映射 Web 而不是索引网页来跟随 Web 组织先前的变革。

移动图 (Mobile graph) 根据移动数据构建。未来的移动数据可能包括来自 Web、应用程序、数字钱包、GPS 和物联网 (IoT) 设备的数据。

4.4 图计算引擎 vs 图数据库

图领域按照应用场景主要分为两个部分:

图数据库: 主要用于联机事务图的持久化技术, 通常直接实时地被应用程序访问, 和常见的联机事务处理 (online transactional processing, OLTP) 数据库是一样的。图数据库支持对图数据模型的增、删、改、查方法, 更关注 OLTP。有的图数据库也继承了少量的图计算能力, 但真正的大型系统还是需要单独的计算框架。

图计算引擎: 主要用于离线图分析技术, 通常按照一些列步骤执行, 它们可以和其他大数据分析技术看作一类, 比如数据挖掘和联机事务分析 (online analytical processing, OLAP)。图计

算引擎技术偏重于全局查询，通常都对于批处理大规模数据做过优化。只有一部分图计算引擎有自己的存储层，其他的都只关注与处理外部传入的数据，然后返回结果到其他地方保存。大多数的图计算引擎都基于 Google 发布的 Pregel 白皮书，白皮书中主要介绍了 Google 如何使用图计算引擎计算网页排名。^[19]

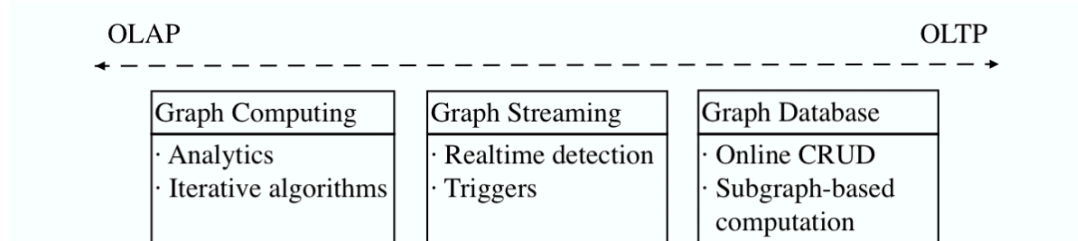


图 5: 图领域的 OLAP & OLTP 场景

5 应用领域

世界上很多著名的公司都在使用图数据库，如：

社交领域：Facebook、Twitter 用它来管理社交关系，实现好友推荐。

零售领域：eBay、沃尔玛使用它实现商品实时推荐，给买家更好的购物体验。

金融领域：摩根大通、花旗和瑞银等银行在用图数据库做风控处理。

汽车制造领域：沃尔沃、戴姆勒和丰田等顶级汽车制造商依靠图数据库推动创新制造解决方案。

电信领域：Verizon, Orange 等电信公司依靠图数据库来管理网络，控制访问并支持客户 360。

酒店领域：万豪和雅高酒店等顶级酒店公司依使用图数据库来管理复杂且快速变化的库存。^[20]

6 与其他数据库的比较

6.1 与其他 NoSQL 数据库的比较

表 1: NoSQL 数据库的比较

分类	数据模型	优势	劣势	举例
键值数据库	哈希表	查找速度快	数据无结构化，通常只被当作字符串或者二进制数据	Redis
列存储数据库	列式数据存储	查找速度快；支持分布横向扩展；数据压缩率高	功能相对受限	HBase
文档型数据库	键值对扩展	数据结构要求不严格；表结构可变；不需要预先定义表结构	查询性能不高，缺乏统一的查询语法	MongoDB
图数据库	节点和关系组成的图	利用图结构相关算法（最短路径、节点度关系查找等）	可能需要对整个图做计算，不利于图数据分布存储	Neo4j、JanusGraph

6.2 与关系型数据库的比较

自从 Edgar F. Codd 于 1970 年发表关于关系模型的论文以来,^[21] 实际上关系数据库已成为大型数据存储系统的行业标准。但是关系模型需要严格的模式, 并且数据规范化对如何查询关系进行了限制。

关系模型强制执行大量的数据规范化以确保一致性。其设计动机之一是实现快速的逐行访问。^[22] 当需要在存储的数据之间形成复杂的关系时会出现问题。尽管可以使用关系模型来分析关系, 但是需要在多个表上对许多不同属性执行包含许多 JOIN 操作的复杂查询。使用关系模型在检索关系时还要考虑外键约束, 从而导致额外的开销。

与关系数据库相比, 图形数据库对于关联数据集来说通常更快, 并且更直接地映射到面向对象的应用程序的结构。因为不需要通常昂贵的 JOIN 操作, 所以图数据库对大量数据可以更自然地扩展。由于图数据库较少地依赖于严格的模式, 因此被推向市场, 更适合于管理模式不断发展的、临时的、不断变化的数据。

相比之下, 关系数据库管理系统通常在对大量数据元素执行相同操作时速度更快, 可以按其自然结构来操纵数据。尽管图数据库具有一定的优势, 并且近期比关系数据库更受欢迎, 但专家建议图模型本身不应成为替换现有关系数据库的唯一原因。如果有证据表明图数据库性能可以提高几个数量级并降低延迟, 可能会更适宜。^[23]

关系数据库本身不具有记录之间存在固定关系的思想, 而是通过将一条记录的唯一键存储在另一条记录的数据中来使相关数据相互连接。相反, 图数据库直接存储记录之间的关系。当执行的搜索深度超过一级时, 图方法的真正价值变得更加明显 (图 6^[23])。且图检索的相对优势随着查询的复杂性而增长。

Depth	RDBMS execution time (s)	Neo4j execution time (s)	Records returned
2	0.016	0.01	~2500
3	30.267	0.168	~110,000
4	1543.505	1.359	~600,000
5	Unfinished	2.132	~800,000

图 6: 测试: 在一个包含 100w 人, 每人约有 50 个朋友的社交网络中找到最大深度为 5 的朋友的朋友

属性为该结构增加了另一层抽象, 也改进了许多常见查询。属性本质上是可以用于任何记录, 或在某些情况下用于边的标签。这些类型的标签在某些情况下可以提高搜索性能, 但通常在为最终用户提供添加的语义数据时更加有用。

关系数据库非常适合平面数据布局, 数据之间的关系是一或两个层次的深度。而图数据库针对包含更多链接的数据集。它们特别适合于社交网络系统, “朋友” 关系基本上不受限制。这些属性使图数据库自然地适用于在线系统和大数据环境中越来越普遍的搜索类型。因此, 图数据库在诸如 Facebook, Google, Twitter, 和在记录间具有深层连接的类似系统中变得非常流行。

也有结果表明, 与关系数据库相比, 图形数据库的简单、压缩、声明式查询不一定提供良好的性能。虽然图数据库提供了数据的直观表示, 但关系数据库在需要集合操作时提供了更好的结果。^[15]

7 图数据库产品

下面列出一些著名的图数据库产品。^[24]

表 2: 图数据库产品

名称	版本	许可证	语言	描述
Neo4j	4.1.2 (2020.09)	GPLv3 社区版, 商业 & AGPLv3 企业和高级版	Java, .NET, JavaScript, Python, Go, Ruby, PHP, R, Erlang/Elixir, C/C++, Clojure, Perl, Haskell	开源, 支持 ACID, 具有用于企业部署的高可用性集群, 并带有基于 Web 的管理工具, 包括完整的事务支持和可视节点链接图浏览器; 可以使用其内置的 REST Web API 接口从大多数编程语言访问, 以及使用官方驱动程序的特有 Bolt 协议
ArangoDB	3.7.2/ (2020.08.21)	免费 Apache 2, 专有	C++, JavaScript, .NET, Java, Python, Node.js, PHP, Scala, Go, Ruby, Elixir	由 ArangoDB Inc. 开发的 NoSQL 原生多模型数据库系统。该数据库系统支持三个重要的数据模型 (键/值、文档、图形)、一个数据库核心和一个统一的查询语言 AQL
OrientDB	3.0.28 (2020-02)	社区版是 Apache 2, 企业版是商业的	Java	第二代分布式图形数据库, 具有灵活性 (即它同时是图数据库和文档数据库); 在开源 Apache 2 许可下获得许可; 拥有完整的 ACID 支持; 它有一个多主复制和分片; 支持无结构模式、全模式和混合模式; 有一个基于用户和角色的安全性分析系统; 支持类似于 SQL 的查询语言; 有 HTTP REST + JSON API
Amazon Neptune	1.0.1.0.200237.0 (2018-09)	专有	未披露	Amazon Neptune 是由 Amazon.com 完全托管的图形数据库。它被用作 Web 服务, 并且是 Amazon Web Services 的一部分。支持流行的图形模型属性图和 W3C 的 RDF, 以及它们各自的查询语言 Apache TinkerPop Gremlin 和 SPARQL
JanusGraph	0.5.2 (2020-05-03)	Apache 2	Java	开源、可扩展、在 Linux Foundation 下的分布式图数据库; 支持各种存储后端 (Apache Cassandra, Apache HBase, Google Cloud Bigtable, Oracle BerkeleyDB); 通过与大数据平台 (Apache Spark, Apache Giraph, Apache Hadoop) 的集成支持全局图数据分析、报告和 ETL; 通过外部索引存储支持地理、数值范围和全文检索 (Elasticsearch, Apache Solr, Apache Lucene)
Oracle Spatial and Graph ; Oracle 数据库的一部分	12.1.0.2 (2014)	专有	Java, PL/SQL	1) RDF 语义图: Oracle 数据库中全面的 W3C RDF 图管理, 具有本机推理和三级标签安全性; 2) 网络数据模型属性图: 用于具有持久存储的物理/逻辑网络和用于内存中图形分析的 Java API

8 挑战

图数据库面临的挑战与多数 OLTP 系统相同:

低延时：一次几秒钟甚至几分钟才能产生结果的查询是不被希望的。例如，风控场景下，在进行在线转账时，判断交易是否有风险的时间可能只有一百毫秒，留给风控判断的时间只有几十毫秒。

高吞吐：现阶段的热门应用（如抖音）日常访问的并发量非常高，峰值可能达到几十万 QPS。

数据量激增：数据量的增加速度快于硬件，尤其是硬盘的增长速度，这给数据库带来了很大的挑战。

分析的复杂性：由于图数据库较新，用户使用前期进行的操作比较简单，例如只做一些 K 度拓展。但随着用户的理解越来越深，会提出更多更加复杂的需求，例如在图遍历过程中进行过滤、统计、排序、循环等，再根据这些计算结果继续进行图遍历。越来越复杂的业务需求要求图数据库提供的功能越来越多。

数据一致性：早期图数据库的使用方法类似于使用二级索引，将较大的数据放在另外的存储组件，例如 HBase 将关联关系放在图数据库中，将图数据库只作为图结构索引来加速。但随着业务越来越复杂，对响应时间要求越来越高，原来的架构不但不方便，性能上也有很大挑战。例如，需要对属性做过滤时，要从 HBase 读取大量数据，各种序列化、过滤操作都很慢。因此产生了新的需求——将数据直接存储在图数据库里，从而自然产生了 ACID 的需求。^[5]

9 小结

图数据库应对的是当今一个宏观的商业世界的大趋势：凭借高度关联、复杂的动态数据，获得洞察力和竞争优势。国内越来越多的公司开始进入图数据库领域，研发自己的图数据库系统。对于任何达到一定规模或价值的数据，图数据库都是呈现和查询这些关系数据的最好方式。而理解和分析这些图的能力将成为企业未来最核心的竞争力。^[20]

参考文献

- [1] BOURBAKIS N G. Artificial intelligence and automation: volume 3[M]. [S.l.]: World Scientific, 1998: 381.
- [2] YOON BYOUNG-HA K S Y, Kim Seon-Kyu. Use of graph database for the integration of heterogeneous biological data[J/OL]. Genomics Inform, 2017, 15(1):19-27. <http://genominfo.org/journal/view.php?number=202>. DOI: 10.5808/GI.2017.15.1.19.
- [3] ANGLES R, GUTIERREZ C. Survey of graph database models[J/OL]. ACM Comput. Surv., 2008, 40(1). <https://doi.org/10.1145/1322432.1322433>.
- [4] SILBERSCHATZ A, KORTH H, SUDARSHAN S. Database system concepts, six edition[M]. [S.l.]: McGraw-Hill, 2009: D-29.
- [5] 图数据库综述与 Nebula 在图数据库设计的实践[EB/OL]. 2020. <https://cloud.tencent.com/developer/article/1484849>.
- [6] LütKEBOHLE I. Graph databases burst into the mainstream[EB/OL]. 2018. <https://www.kdnuggets.com/2018/02/graph-databases-burst-into-the-mainstream.html>.
- [7] SILBERSCHATZ A, KORTH H, SUDARSHAN S. Database system concepts, six edition[M]. [S.l.]: McGraw-Hill, 2009: E-20.
- [8] LORRAINE P. Ims notes[EB/OL]. <http://www.people.vcu.edu/~lparker/IMS.html>.
- [9] KUPER G M. The logical data model: A new approach to database logic.[D]. [S.l.]: STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE, 1985.

- [10] Sap announces new capabilities in the cloud with hana[EB/OL]. 2014. <https://www.dbta.com/Editorial/News-Flashes/SAP-Announces-New-Capabilities-in-the-Cloud-with-HANA-100186.aspx>.
- [11] 关贺宇. 图数据库竞争日趋激烈, 淘汰正在进行[EB/OL]. 2020. <https://www.infoq.cn/article/jDUXaVciehXVoK0qG4KL>.
- [12] Popularity changes per category, october 2020[EB/OL]. 2020. https://db-engines.com/en/ranking_categories.
- [13] FRISENDAL T. Property graphs: The swiss army knife of data modeling[EB/OL]. 2017. <https://www.dataversity.net/property-graphs-swiss-army-knife-data-modeling/>.
- [14] DAS S, SRINIVASAN J, PERRY M, et al. A tale of two graphs: Property graphs as rdf in oracle[C]//[S.l.: s.n.], 2014.
- [15] HAVE C T, JENSEN L J. Are graph databases ready for bioinformatics?[J/OL]. Bioinformatics, 2013, 29(24):3107-3108. DOI: 10.1093/bioinformatics/btt549.
- [16] Resource description framework (rdf): Concepts and abstract syntax[EB/OL]. 2004. <https://www.w3.org/TR/rdf-concepts/#section-Overview>.
- [17] The open graph protocol[EB/OL]. ogp.me.
- [18] VALDES R. The competitive dynamics of the consumer web: Five graphs deliver a sustainable advantage[EB/OL]. 2012. <https://www.gartner.com/en/documents/2081316>.
- [19] 京东图计算系统 JoyGraph[EB/OL]. 2019. <https://www.biaodianfu.com/joygraph.html#at>.
- [20] 图数据库-neo4j[EB/OL]. 2020. <https://www.cnblogs.com/liyhb/archive/2004/01/13/13602304.html>.
- [21] CODDE F. A relational model of data for large shared data banks[M]//Software pioneers. [S.l.]: Springer, 2002: 263-294.
- [22] Concepts: Relational to graph[EB/OL]. https://neo4j.com/developer/graph-db-vs-rdbms/#_from_relational_to_graph_databases.
- [23] IAN ROBINSON J W, EIFREM E. Graph databases, 2nd edition[M]. [S.l.]: O'Reilly, 2015.
- [24] Graph database[EB/OL]. 2020. https://en.wikipedia.org/wiki/Graph_database#Graph_types.
- [25] Using graph databases in neo4j with cypher[EB/OL]. 2015. <https://www.jrebel.com/blog/using-graph-databases-in-neo4j>.