



CCF 大数据教材系列丛书
CCF 大数据专家委员会 组编

主编 金海 石宣化

大 数 据

处 理

高等教育出版社



CCF 大数据教材系列丛书
CCF 大数据专家委员会 组编

主编 金海 石宣化

大	数	据
处	理	

大	数	据	Dashuju Chuli
	处	理	

图书在版编目(CIP)数据

大数据处理 / 金海, 石宣化主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2018.12
ISBN 978-7-04-050935-9

I. ①大… II. ①金… ②石… III. ①数据处理-高等学校-教材 IV. ①TP274

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第257585号

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话

(010) 58581999 58582371
58582488

反盗版举报传真

(010) 82086060

反盗版举报邮箱

dd@hep.com.cn

通信地址

北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社法律事务

与版权管理部

邮政编码 100120

防伪查询说明

用户购书后刮开封底防伪涂层，利用手机微信等软件扫描二维码，会跳转至防伪查询网页，获得所购图书详细信息。也可将防伪二维码下的20位密码按从左到右、从上到下的顺序发送短信至106695881280，免费查询所购图书真伪。

反盗版短信举报

编辑短信“JB, 图书名称, 出版社, 购买地点”发送至10669588128

防伪客服电话

(010) 58582300

策划编辑 王勇莉

责任编辑 黄涵玥

书籍设计 张申申

插图绘制 于博

责任校对 窦丽娜

责任印制 赵义民

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购

<http://www.hepmall.com.cn>

<http://www.hepmall.com>

<http://www.hepmall.cn>

印刷 北京盛通印刷股份有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 21.5

字数 430千字

版次 2018年12月第1版

印次 2018年12月第1次印刷

定价 48.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 50935-00



内容简介

为培养学生理解大数据、处理大数据以及大数据系统优化的能力,本书从思维、编程、优化三个方面系统阐述大数据处理的系统架构、编程、优化等核心技术以及方法。全书内容共9章,包括大数据处理基础、大数据存储基础、大数据管理基础、大数据编程、流计算、图计算、大数据系统管理、大数据系统优化技术、大数据资源链接等内容,技术章节内容均设有导言、习题和参考文献。

本书既可供高校相关专业教学使用,也可供大数据领域工程师或者有志于大数据领域工作或研究的科技人员使用。

大数据教材系列丛书编委会

主任 梅 宏

成员 (按姓名拼音排序)

卜佳俊 陈宝权 陈恩红

程学旗 杜小勇 方 粮

胡 斌 黄宜华 金 海

马华东 潘柱廷 王建民

王晓阳 王元卓 袁晓如

周傲英 周 涛 周晓方

随着大数据的蓬勃发展，大数据领域人才的需求越来越大，大数据人才培养受到了各界的广泛关注。2016年，教育部开始批准设立“数据科学与大数据技术”本科专业，越来越多的高校申请开设“数据科学与大数据技术”专业或开设大数据方向的相关课程，截至2018年3月，已有近三百所高校获批建设“数据科学与大数据技术”专业。虽然大数据专业和大数据方向的课程不断开设，但是，当前我国高校的大数据教学尚处在摸索阶段，尤其缺乏成熟的、系统性和规范性的大数据教学体系和教材。

在此背景下，中国计算机学会大数据专家委员会成立了大数据教材系列丛书编委会，着手编著系列化、规范化的大数据教材。自2017年6月，经编委会多次研讨，形成丛书框架，作者们随即开始紧张的编写工作。编委会和作者间也有多轮的初稿审阅和研讨交流。数易其稿，终于付梓。

大数据教材系列丛书采用“1+3+X”的体系，即以1本《大数据导论》为基础，设置《大数据管理》《大数据处理》《大数据分析》3本关键技术教材，以及针对行业领域的X本应用教材。本套教材系列丛书既适合高校大数据专业的专科生、本科生以及研究生系统地学习大数据相关知识与技术，也适合从事大数据相关技术的企事业单位研究人员、工程师作为参考用书。

《大数据导论》是一本全面介绍大数据相关知识的专业通识教材，其系统地介绍大数据涵盖的内容，包括数据与大数据、大数据获取与感知、大数据存储与管理、大数据分析、大数据处理、大数据治理、大数据安全与隐私等，同时还介绍了部分行业中大数据的典型应用案例，反映了大数据在社会经济生活中的重要价值。

《大数据管理》首先综述数据管理系统的发展，指出发展大数据管理系统是历史的必然，并沿着数据模型和系统构件两个维度上展开。在数据模型的维度上，主要介绍关系、键值对、图和文档数据模型及其语言；在系统维度上，介绍系统结构、存储与组织、查询处理、事务管理、故障恢复等话题。

《大数据处理》包括大数据处理基础技术、大数据处理编程与典型应用处理、大数据处理系统与优化三个方面。本教材以大数据处理编程为核心，从基础、编程到优化等多个方面对大数据处理技术进行系统介绍，

使得读者能够快速入门，同时体会大数据处理系统的设计理念与优化方法本质。

《大数据分析》包括大数据分析方法和理论、典型大数据分析任务以及大数据分析系统与应用。本教材特色是理论联系实际，本书从基础理论、典型任务以及系统应用多个方面对大数据分析相关知识进行了系统而详细的介绍，使得读者能够快速入门，体会大数据分析技术的本质特征，领略大数据技术带来的创新理念。

“X”系列教材包含面向各行各业的大数据应用的知识与技术，既可面向工程实践，又可面向职业培训，且将随着产业界大数据应用的发展进行更新迭代。

大数据已成为学术界、产业界和政府共同关注的热点，正在开启信息化的新阶段。大数据人才培养也刚刚起步，还需要付出更多努力去探索。通过汇集中国计算机学会大数据专家委员会的智力资源，丛书编委会希望本系列教材能够为我国大数据人才培养尽到绵薄之力，助力我国大数据事业的蓬勃发展。尽管编委会和作者花费了很大精力规划和编写本系列教材，但是囿于对大数据的认识局限和自身能力限制，难免存在疏漏和错误，欢迎读者批评指正，以待再版时修正完善。

大数据教材系列丛书编委会

2018年7月

如今，大数据已经成为国家战略，大数据相关产业的飞速发展，大数据生态的欣欣向荣，带来大数据人才的严重短缺。教育部2016年批准高校设立“数据科学与大数据技术”专业，目前已有近三百所高校获批建设该专业。在此背景下，中国计算机学会大数据专家委员会组建了大数据教材系列丛书编委会，编著大数据系列教材，本书是该系列教材之一。

1. 本书的编写思路和内容组织

大数据最早起源于高性能计算领域数据密集型应用，最为典型是Jim Gray提出的科研“第四范式”的概念。但使得大数据获得广泛关注的是Google公司提出的MapReduce编程模型以及在国际开源社区的Hadoop系统。在Hadoop系统之上构建了系列大数据处理生态系统，并在互联网企业获得广泛应用，Hadoop系统也一度被称为大数据处理引擎，后期一些以内存为中心的MapReduce系统从生态来说也基本与Hadoop系统生态一致。相比于传统高性能计算数据密集型处理编程模型，MapReduce模型的设计初衷就是为了迎合数据的快速增长，实现很好的横向性能扩展。另外，大数据具有产生快速、形态多样的特性，在大数据开源生态中以流计算、图计算系统最为典型。本书编写的初衷就是让读者能够从理解大数据处理的根本诉求出发，强调对于大数据处理应用的编程实践，在此基础上认识大数据处理的发展趋势，从早期大数据处理简单强调性能横向扩展能力到互联网企业大数据处理的降低成本需求以及提升大数据处理服务质量需求，懂得大数据处理架构的典型优化技术。

本书内容围绕互联网领域大数据处理生态系统的典型架构，从“理解大数据”“处理大数据”“系统观建立”三个角度培养学生大数据处理系统能力。对应以上三个方面的系统能力，本书从思维、编程、优化三个部分来编写，即基础技术篇、编程处理篇以及系统与优化篇，每个部分设立3章。

第1章是大数据处理基础，从体系结构、编程、存储、处理模式、大数据特征等角度诠释大数据处理，总览全书。第2章是大数据存储基础，从大数据分布式存储的需求以及关键技术理解大数据存储，同时了解新型器件下的大数据存储。第3章是大数据管理基础，从方便大数据处理的角度理解大数据管理，理解数据划分技术、多种数据格式的数据

组织、典型大数据仓库技术等。编程处理篇着重数据处理本身，从应用编程、典型数据处理的角度培养学生的动手能力，3个章节分别为大数据编程、流数据处理与图计算。大数据编程主要从函数式编程入手，讲述MapReduce的编程思想以及典型案例。流数据处理从计算模型、编程方法、系统优化等方面讲述如何构建流处理系统、如何提升流处理系统能力。图计算主要让读者了解图数据本身，理解图计算对计算机系统的挑战，懂得图计算系统编程，熟悉典型图计算算法特征以及性能评估方法。系统与优化篇主要包括3个章节：大数据系统管理技术、大数据系统优化技术以及国内外研究动态。大数据系统管理主要是理解大数据处理系统平台资源组织，理解云计算环境下多任务管理机制，理解大数据分布式资源管理机制与服务协调机制。大数据优化技术主要是理解大数据处理系统优化的基本思路，从大数据处理系统的关键组件分析，学习产业界典型的系统优化方法。国内外研究动态则通过国内外研究团队、开源软件、典型项目等形式来阐述。

2. 读者需要的背景知识

本书假定读者对C语言程序设计、Java语言以及类似的面向对象语言程序设计有一定的基础，已经熟知这些语言的语法以及控制语句、数据类型及其运算、表达式、函数调用等相关知识。

此外，本书涉及一些基本的计算机算法常识如数据结构中图、链表，以及计算机系统常识，如磁盘速度与内存速度差异等。

3. 使用本书作为教材的课程和建议

目前国内计算机专业设置大多按照计算机层次结构进行课程切分，可将本书作为计算机系统的后续内容，讲解高级计算机系统架构设计，也可以将本书作为分布式系统课程的补充教材。对于数据科学与大数据技术专业学生，可将本书作为高年级专业课教材讲授，并配以课程设计，增强学生的大数据处理系统能力。讲授课时不低于32学时，课程设计课时不低于16课时。

4. 参编人员

本书第1章由华强胜参与编著，第2章由吴松参与编著，第3章由袁平鹏参与编著，第4章由郑然参与编著，第5章由陈汉华参与编著，第6章由廖小飞参与编著，第7、8、9章由石宣化参与编著。

大数据处理生态复杂，尚未有经典教材和教案可供选择，本书在内

容上力求做到取材先进并反映技术发展现状，在内容的组织和表述上力求概念清晰准确、通俗易懂。但由于作者认识和水平所限，本书内容仅是看待大数据处理的一个视角，难免偏颇。大数据处理生态还在蓬勃发展中，未来大数据处理技术会随着硬件体系结构演进而演进，由于本书出版时间紧，在编写过程中难免存在不当或遗漏之处，恳请读者批评指正，并积极反馈意见和建议，我们将在再版时吸纳，使本书逐步趋于完善。编者邮箱：xhshi@hust.edu.cn。

编者

2018年9月于武汉

■ 第1章 大数据处理基础001	2.2 分布式文件系统043
1.1 大数据特征001	2.2.1 分布式文件系统概述043
1.1.1 基本特征001	2.2.2 HDFS 的系统架构045
1.1.2 数据模型003	2.2.3 数据分布048
1.2 大数据存储模式005	2.2.4 复制与一致性050
1.2.1 分布式文件系统005	2.2.5 容错机制051
1.2.2 大数据存储形式008	2.2.6 读写流程054
1.2.3 大数据存储实例009	2.3 分布式键值系统057
1.3 大数据处理模式010	2.3.1 分布式键值系统概述057
1.3.1 并行处理010	2.3.2 Dynamo 概述057
1.3.2 分布式处理013	2.3.3 数据分布059
1.3.3 控制流的处理018	2.3.4 复制与一致性060
1.3.4 数据流的处理020	2.3.5 容错机制063
1.4 大数据编程模式021	2.3.6 负载均衡065
1.4.1 批处理021	2.3.7 读写流程067
1.4.2 流处理021	2.4 新型存储器件驱动的内存系统068
1.4.3 交互式数据处理022	2.4.1 内存系统对大数据处理的重要性068
1.4.4 图处理023	2.4.2 非易失性存储器070
1.5 大数据处理体系结构023	2.4.3 异构内存系统073
1.5.1 数据中心024	2.5 本章小结075
1.5.2 数据中心体系结构024	参考文献076
1.5.3 数据中心的网络拓扑结构027	习题076
1.6 本章小结与全书内容组织031	
参考文献032	
习题032	
■ 第2章 大数据存储基础033	■ 第3章 大数据管理基础077
2.1 分布式存储系统简介033	3.1 大数据管理挑战概述077
2.1.1 分布式存储系统的基本概念034	3.1.1 面向数据管理的大数据特征077
2.1.2 数据分布035	3.1.2 大数据的管理需求079
2.1.3 复制与一致性038	3.2 大数据的划分081
2.1.4 容错机制040	3.2.1 数据划分方法081
2.1.5 可扩展性041	3.2.2 数据一致性理论084
	3.3 大数据的组织管理方式088
	3.3.1 关系数据库089
	3.3.2 Key-Value 数据库092

3.3.3 列族数据库094	5.3.2 Spark Streaming.....180
3.3.4 文档数据库096	5.3.3 Apache Flink.....184
3.3.5 图数据库099	5.4 流处理系统机制及优化188
3.4 大数据仓库系统106	5.4.1 流处理调度及优化188
3.4.1 数据仓库的发展历史108	5.4.2 流处理一致性语义192
3.4.2 大数据仓库的特性114	5.4.3 流处理容错195
3.4.3 实例: Hive 分析118	参考文献197
3.4.4 大数据仓库的未来128	习题197
3.5 本章小结129	
参考文献129	
习题129	
■ 第4章 大数据编程131	■ 第6章 图计算199
4.1 函数式编程131	6.1 图计算背景199
4.1.1 函数式编程的起源131	6.1.1 图计算简介199
4.1.2 函数式语言家族成员133	6.1.2 图计算特点201
4.1.3 函数式编程的概念及特点137	6.1.3 图计算实例201
4.2 MapReduce 编程143	6.2 图计算并行编程模型202
4.2.1 MapReduce 的起源143	6.2.1 以点为中心的编程模型202
4.2.2 MapReduce 的工作原理145	6.2.2 以边为中心的编程模型205
4.2.3 MapReduce 的主要特点148	6.2.3 以路径为中心的编程模型205
4.3 MapReduce 案例研究151	6.2.4 以子图为中心的编程模型208
4.3.1 WordCount 程序分析151	6.3 图划分和通信209
4.3.2 PageRank 程序分析155	6.3.1 图划分策略210
4.4 本章小结161	6.3.2 消息推送机制212
参考文献161	6.4 单机图计算系统215
习题161	6.4.1 内存图计算系统216
	6.4.2 核外图计算系统220
■ 第5章 大数据流处理163	6.5 图计算硬件加速技术229
5.1 流处理基础和应用163	6.5.1 基于 GPU 的图计算加速技术229
5.1.1 流处理概述163	6.5.2 基于 MIC 的图计算加速技术233
5.1.2 流处理应用166	6.5.3 基于 FPGA 的图计算加速技术234
5.2 分布式流计算169	6.5.4 基于 ASIC 的图计算加速技术236
5.2.1 数据封装169	6.6 图算法案例239
5.2.2 建立应用拓扑171	6.6.1 图拓扑属性算法240
5.2.3 指定操作的并行度172	6.6.2 图数据管理和查询算法244
5.2.4 指定数据分组与传输方式173	
5.2.5 本节小节174	
5.3 开源系统及编程模型175	
5.3.1 Apache Storm.....175	6.7 图计算性能评价246

6.8 本章小结	251	习题	290
参考文献	251		
习题	252		
■ 第7章 大数据系统管理	255	■ 第8章 大数据系统优化技术	291
7.1 统一资源管理	255	8.1 存储优化	292
7.1.1 统一资源管理的设计思想	257	8.1.1 数据局部性优化	292
7.1.2 统一资源管理的基本架构	258	8.1.2 服务可扩展性优化	298
7.1.3 统一资源管理的工作流程	260	8.2 调度优化	301
7.2 大数据系统资源调度	265	8.2.1 调度模型	301
7.2.1 资源调度系统的架构	265	8.2.2 数据本地化	302
7.2.2 典型调度算法	268	8.2.3 负载均衡	304
7.2.3 拖后腿问题与推测执行	307	8.2.4	
7.3 大数据系统的协调技术	274	8.3 运行时优化	310
7.3.1 协调系统的架构与原理	274	8.3.1 中间结果缓存	310
7.3.2 复制状态机模型	278	8.3.2 序列化开销优化	313
7.3.3 分布式一致性算法	279	8.4 本章小结	319
7.4 案例研究	282	参考文献	320
7.4.1 YARN	283	习题	320
7.4.2 ZooKeeper	286	■ 第9章 大数据资源链接	321
7.5 本章小结	289	■ 重要名词索引	323
参考文献	290		

第1章 大数据处理基础

本章为全书导览，将从大数据特征、存储模式、处理模式、编程模式以及体系结构五个方面诠释大数据处理的基本知识，借此让大家了解大数据基本特征以及各特征对大数据处理、存储和编程带来的挑战和应对解决方案。

1

1.1 大数据特征

1.1.1 基本特征

最近几年，大数据技术风起云涌，成为当前学术界和产业界的研究热点。大数据是继云计算、物联网之后又一次颠覆性的技术革命，并且不断影响着人们的生活习惯和思考模式。

美国国家标准与技术研究院（National Institute of Standards and Technology, NIST）大数据工作组在《大数据互操作框架第1卷：定义》（*Big Data Interoperability Framework: Volume 1, Definitions*）中提出关于大数据的定义：大数据是指那些传统数据架构无法有效处理的新数据集。因此需要采用新的架构来高效完成数据处理，这些数据集特征包括：容量、数据类型多样性、多个领域数据的差异性、数据的动态性^[1,2,8]。2001年Gartner公司分析师莱尼（Doug Laney）在报告《3D数据管理：控制数据数量、速度及种类》（*3D DATA Management: Controlling Data Volume, Velocity and Variety*）中提出大数据成长将朝3个方向发展，分别为数据即时处理的速度（velocity）、数据多样化（variety）与数据量的规模（volume）^[3,27]。随着数据量的复杂程度愈来愈高，“3V”已经不能准确地形容新时代的大数据特性。国际数据公司（International Data Corporation, IDC）、中国科学院和中国工程院研究人员在报告^[4-5]中提出了大数据的“价值性”（value）^[8]。2013年，IBM在一份名为《分析：大数据在现实世界中的应用》（*Analytics: The real-world use of big data in financial services*）的研究报告中在原本的速度、多样化与规模的特性上提出了一个新的特性，即“准确性”（veracity）^[6]。就此，大数据具有了“5V”特点。下面分别介绍大数据的这五个特点。

(1) volume——数据体量大

大数据通常指10 TB以上的数据量。目前,大数据的规模尚是一个不断变化的指标,单一数据集的规模从TB到PB不等。国际数据公司的研究表明,预计到2020年全球产生的数据量高达35 ZB^[7],相当于80亿块4 TB硬盘。IDC最新的研究显示,全球数据量的增长速度有可能超越摩尔定律。

(2) velocity——数据增长速度快

velocity指的是数据增长速度快,以及数据访问和处理等操作速度快^[8]。在很多应用中,数据的价值在于时效性,如搜索引擎要求用户能够实时查询到新闻,对用户的个性化分析能够实时完成等,这是大数据区别于传统数据挖掘的显著特征。现在处理的数据量正在由PB级替代TB级,我们强调数据是快速动态变化的,形成流式数据是大数据的重要特征。

(3) variety——数据种类繁多

variety即数据类型多样。随着传感器种类的增多以及智能设备、社交网络的流行,数据类型也变得更加复杂。数据类型不仅包括传统的关系数据类型,也包括半结构化和非结构化数据^[7]。数据类型繁多和多变的特点增加了存储和处理的难度,对数据的处理能力也提出了更高的要求。

(4) value——价值密度低

数据量呈指数增长的同时,隐藏在海量数据中的有用信息却没有相应地成比例增长,相反,我们获取有用信息的难度加大^[7]。随着互联网以及物联网的广泛应用,信息感知无处不在,但价值密度较低,如何挖掘数据价值是大数据时代最需要解决的问题。大数据能够将低价值密度的数据整合为高价值、作用巨大的信息资产。如美国社交网站Facebook有10亿用户,网站对这些用户信息进行分析后,广告商可根据结果精准投放广告^[8]。

(5) veracity——数据准确性

veracity即数据的准确性和可信赖度,包括可信性、真伪性等特征。IBM商业价值研究院在发布的《分析:大数据在现实世界中的应用》报告中指出:“追求高数据质量是一项重要的大数据要求和挑战,但是,即使最优秀的的数据清理方法也无法消除某些数据固有的不可预测性,例如天气、经济或者客户最终的购买决定。不确定性的确认和规划的需求是

大数据的一个维度。”因此在大数据应用中，我们要尽力保障数据的准确性^[8]。

1.1.2 数据模型

访问数据库中的数据的方式取决于该数据库运用的数据模型。数据模型决定了客户端应用程序如何对数据进行编码以便存储。当下典型的数据模型可以分为行式数据、列式数据、键值存储数据、文档数据以及图数据^[26]。

(1) 行式数据

行式数据是指利用行（或元组）构成的记录进行存储，将记录存储在表中。表由模式（schema）定义，这种模式能够确定表中的列。表中的每一列都需要定义名称和类型，并且表中的所有记录都必须符合表的定义。SQL是一种查询语言，旨在对表进行操作。SQL提供相应的语法查找符合条件的记录，例如通过连接将一个表中的记录与另一个表中的记录相关联（Join操作）。行式数据存储是把一行中的数据值串在一起存储起来，然后再存储下一行的数据，以此类推。常用的数据库有MySQL和Sybase。行式数据存储可以创建（插入）或删除，记录中的字段可以单独更新。为了获得高性能数据访问，一般使用B-Tree或哈希映射等方式对表进行索引。

在大数据环境下，并不是所有行式数据都能满足数据处理的以下需求：高并发读写、海量数据的高效率存储和访问以及数据库高可扩展性和高可用性。因此行式数据通常不用于分布式、高并发和大数据处理。

(2) 列式数据

列式存储类似于行式存储，是以列相关存储架构进行数据存储。列式存储并不存储记录，而是将所有列的值存储在一个流中，非常适合批量数据处理和即时查询。此外索引提供了获取任何特定记录的列的值的方法。具体而言，列式数据将一系列中的数据值一起存储，然后再存储下一列的数据，以此类推。这种方式具有以下优点：① 查询时需要读取的块数少，查询速度快；② 同一类型的列存储在同一位置，数据压缩比高。通过传输数据来实现MapReduce的操作（如Hadoop）效率最高，列式存储非常适用于这类场景。

列式存储支持记录检索，但是这需要从各个列中获取列值并重新组

装记录，因此其插入更新慢，不适合频繁变化的大数据。

（3）键值对数据

键值存储即Key-Value存储，简称KV存储，它是NoSQL存储的一种方式。它的数据按照键值对的形式进行组织、索引和存储，提供对基于索引的值的访问。键值对可以创建（插入）或删除，与索引相关联的值可能会更新。键值存储为存储本身提供了一个隐式索引。因此，它非常适合不涉及过多数据关系和业务关系的业务数据，同时能有效减少读写磁盘的次数，比SQL数据库存储拥有更好的读写性能。键值存储类似于哈希表，STL库中的map和hash_map，Java中的hash_table和hash_map都是键值存储，不过它们只支持内存操作，而且map的查询效率太低。分布式键值存储数据库有Redis和Aerospike。

（4）文档数据

文档存储提供对结构化数据的访问，但与关系模型不同，文档存储没有强制执行的模式。事实上，文档数据存储一系列已经封包好的键值对。为了在这种环境下运行，应用程序采用一些关于如何处理它可能检索到的不同包的约定，或者根据存储引擎的能力将不同的文档划分成不同的集合以管理数据。文档存储模型支持嵌套结构。例如，文档存储模型支持XML和JSON文档，字段的“值”又可以嵌套存储其他文档。此外，文档存储模型也支持数组和列表键值（list-valued keys）。

与键值存储不同的是，文档存储关心文档的内部结构。这使得存储引擎可以直接支持二级索引，从而允许对任意字段进行高效查询。支持文档嵌套存储的能力，使得查询语言具有搜索嵌套对象的能力，Xquery就是一个典型示例。MongoDB通过支持在查询中指定JSON字段路径实现类似的功能。常见的文档存储数据库有MongoDB和CouchDB。

（5）图数据

图结构的数据库同其他行列以及关系型数据库不同，它使用灵活的图数据模型，并且能够在分布式环境下扩展到多个服务器上。图数据库存储顶点和顶点之间的边的信息，有些支持向顶点或边添加注释。图数据可以用来模拟社交图（人用顶点表示，人与人之间的关系用边来表示）或者真实世界的对象（对象用顶点表示，对象间的连通性用边来表示）等各种事物之间的关系。IMDB（internet movie database）上的内容通过点与边连接在一起组成一张复杂的图：电影与演员相互关联，演员