

21世纪高等学校规划教材 | 计算机科学与技术

高级数据库技术

杜金莲 编著



清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 计

高级数据库技术

杜金莲 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是面对研究生教育而编写的数据库系统教科书,其主要目标是介绍数据库实现时所涉及的核心技术,从而让读者了解数据库管理系统的工作原理。书中前6章是本书的重点,集中介绍传统集中式数据库系统在实现过程中解决关键问题所涉及的各种理论和方法,如数据存储技术、数据库索引技术、查询及优化方法和事务管理技术等。第7章对数据库系统的体系结构进行了系统的总结和比较,第8~11章则对分布式数据库系统及其核心技术的研究进行介绍,包括分布式数据库的设计、分布式查询及优化、分布式事务管理及故障恢复和分布式并发控制技术。

本书是在作者长期的教学和科研的基础上认真总结编写而成的。书中对数据库的核心技术进行讲解,并配有大量的图示和例题进行说明,以增加可理解性。对于一些未有成熟解决方案的问题,则根据目前常用的解决方法或思路进行讨论。另外,书中配有大量习题,以使读者加深对书中理论的理解。

本书可作为计算机专业研究生专业课教材,也可作为从事数据管理领域研究和应用开发人员的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高级数据库技术/杜金莲编著.--北京:清华大学出版社,2013

21世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术

ISBN 978-7-302-30785-3

I. ①高… II. ①杜… III. ①数据库系统 IV. ①TP311.13

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第287057号

责任编辑:梁颖 王冰飞

封面设计:傅瑞学

责任校对:时翠兰

责任印制:宋林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:23

字 数:559千字

版 次:2013年6月第1版

印 次:2013年6月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程(简称‘质量工程’)”,通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

(1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。

(6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。

(7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。

(8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail: weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前言

毫无疑问,数据管理技术已经成为现代计算环境的重要支撑技术,因此也成为计算机专业教育的核心内容。计算机专业的本科生均需要学习“数据库原理”这门课程,以掌握数据管理的基本概念和基础理论。而计算机专业对研究生也有选择地开设数据管理技术课程,以帮助学生深刻理解数据管理的核心技术。

我们知道,随着计算机网络技术、无线通信技术的发展,数据从应用形式到类型都发生了巨大的变化,数据管理技术在不同的应用领域正面临着各种各样的挑战,如何为不同的数据管理应用提供好的解决方案已成为企业和研究人员共同面对的课题。传统的集中式数据库系统的核心技术,如数据组织与存储、索引、查询处理及优化和事务管理技术中使用的大量方法等,是人们解决数据管理新问题的基础,因此对于未来从事数据管理工作和研究的人员来说,学习这些核心技术是非常必要的。基于此,我们认为研究生时期的学生应该在本科数据库课程所学内容的基础上,即在掌握数据库的基本概念、基本理论和基本设计方法之后,深入学习数据库系统的内部实现机制,从而为将来从事数据库领域应用系统的开发,甚至为未来进行数据管理领域的相关研究奠定理论基础。

关于数据库系统的核心实现技术在一些文献中早已有叙述,如《数据库系统概念》(*Database System Concept*, Abraham Silberschatz, Henry F. Korth, S. Sudarshan 著,杨冬青,马秀莉,唐世渭等译)和《数据库系统全书》(*hector garcia-molina, jeffrey d. ullman, jennifer widom 著,岳丽华,杨冬青,龚育昌,唐世渭,徐其钧等译*)两本著作中对数据库系统中的数据组织存储、索引、查询处理及优化、事务管理与并发控制等进行了详细的描述。本书在参考这些文献的基础上,根据多年的教学经验对这些内容进行了系统的梳理,为重点知识增加实例,以进行解释,对一些重要问题的各个算法进行了对比,以增加读者的理解。由于近年来的云计算、物联网等新型分布式应用的产生促进了分布式数据管理的应用,本书在参照邵佩英编写的《分布式数据库系统及其应用》和其他相关资料的基础上对分布式数据库系统的相关技术也进行了详细的介绍。由于分布式数据库系统关键问题的解决和处理均是以集中式数据库系统中的理论和算法为基础进行扩展而来的,所以将分布式数据库系统实现的相关理论和机制与传统数据库的核心技术内容放在一起也有利于读者对分布式数据库系统实现机制的理解和掌握。同时,通过学习分布式数据库系统中解决关键问题的方法,也为其他新型数据管理技术关键问题的解决提供一个研究的思路。

本书要求读者已经熟悉计算机基础知识,如数据结构、操作系统、计算机组织结构、一门程序设计语言,如 C 或 Java。

本书共 11 章,其中,前 6 章重点介绍集中式数据库的核心实现技术,对数据库中数据的组织方法、主流商品化数据库中常用的索引技术、查询处理过程及优化机制、事务的基本概念及管理机制、数据库的故障恢复及事务的并发控制机制等内容进行了详细的描述。后 4 章介绍了分布式数据库的基本理论和实现机制,包括分布式数据库的设计及构建方法、分

布式查询处理及优化方法、分布式事务管理及并发控制机制等。具体内容如下:

第1章作为从基础向高级知识的过渡,主要介绍了数据库的基本知识,包括数据库的基本概念、数据模型、数据库建模等。最后对数据管理技术近年来新的发展方向进行了阐述。

第2章主要介绍数据文件的组织和存储方法,对存储介质的类型和性质、数据元素的表示、元组的组织、数据文件的组织等进行了详细的描述。

第3章主要介绍了数据库的索引技术,主要对商品化数据库系统使用的索引结构进行了介绍,内容包括索引顺序文件、B⁺树索引、散列索引、多维索引中的R树索引结构、网格文件及位图索引结构,并对每种索引结构都分析了它的优缺点及适用范围。

第4章主要介绍了数据库系统的查询处理和优化技术,对查询处理过程进行了详细的描述。对查询处理过程中使用的主要算法,如基于排序的算法、基于索引的算法和基于散列的算法进行了描述。对查询处理过程中使用的优化方法也进行了详细的分析。

第5章主要介绍了事务管理及数据库的故障恢复机制,内容包括事务的基本概念、状态变化、基于日志的恢复等。

第6章主要介绍了事务的并发控制机制,详细阐述了事务并发控制的基本理论——可串行化理论,以及几种在商品化数据库中使用的并发控制机制,即锁机制、时间戳机制、多版本协议等。

第7章主要对目前数据库系统的体系结构进行了总结和分析,内容包括集中式结构、客户/服务器结构、分布式结构及并行数据库。

第8章介绍了分布式数据库的相关理论和实现技术。本章主要阐述了分布式数据库的基本概念和分布式数据库的设计方法,包括分布式数据库系统的物理结构、逻辑结构、分布式数据库系统的分类等。

第9章主要介绍了分布式数据库的查询处理技术,包括查询的处理过程、查询的优化算法,如半连接算法、直接连接法等。

第10章介绍了分布式数据库系统的事务管理及故障恢复技术,对分布式事务管理的概念和目标进行了阐述,给出了分布式事务管理的抽象模型及事务执行时的控制模型,介绍了保证分布式数据库的故障恢复的两阶段事务提交模型。

第11章主要介绍了分布式事务的并发控制机制,内容包括分布式并发控制的理论基础、基于锁的并发控制实现方法、死锁处理及乐观的并发控制方法等。

本书受北京工业大学研究生课程建设项目——“北京工业大学研究生创新教育系列教材”支持,由北京工业大学计算机学院杜金莲撰写。在撰写本书的过程中,努力使本书集中在数据库实现的核心技术上,同时也结合数据库技术的新进展对经典算法进行解读和分析。但由于作者本人学识有限,书中难免有不足之处,敬请专家和学者批评指正。

编 者

2013年3月

目 录

第 1 章 数据库及其基本理论	1
1.1 数据库技术概述	1
1.1.1 数据模型	1
1.1.2 数据库管理系统	3
1.1.3 数据库系统	5
1.2 关系数据库及其设计理论	8
1.2.1 关系模型	8
1.2.2 实体-联系模型	9
1.2.3 约束的建模	13
1.2.4 E-R 模型设计的原则	14
1.2.5 从 E-R 模型向关系模型的设计	15
1.2.6 关系的优化组合	18
1.2.7 关系模式的设计	18
1.2.8 数据库设计中的其他问题	19
1.3 SQL 简介	19
1.3.1 通过 SQL 语句实现数据库及相关对象的定义	20
1.3.2 SQL 查询语句的基本结构	21
1.3.3 编程环境下的 SQL	22
1.4 数据库技术的新进展	23
1.5 小结	26
1.6 习题	27
参考文献	27
第 2 章 数据的组织与存储	29
2.1 存储器的层次及特性	29
2.1.1 高速缓冲存储器	29
2.1.2 主存储器	30
2.1.3 磁盘存储器	30
2.1.4 三级存储器	30
2.2 磁盘结构及访问特性	31
2.2.1 磁盘的结构	31

2.2.2 磁盘的访问特性	32
2.3 数据元素的表示	33
2.3.1 字段的表示	33
2.3.2 元组的表示	35
2.4 数据文件在磁盘上的组织	40
2.5 数据文件的其他组织方式	43
2.6 数据访问的优化	44
2.6.1 数据库访问的成本	45
2.6.2 加速磁盘访问的策略	45
2.7 故障恢复及数据冗余	47
2.7.1 稳定存储	48
2.7.2 磁盘镜像冗余技术	48
2.8 小结	51
2.9 习题	51
参考文献	52
第3章 数据库索引技术	54
3.1 索引及其类型	54
3.2 简单的顺序文件索引	57
3.2.1 顺序文件索引的查询	57
3.2.2 顺序文件索引的维护	58
3.3 简单的辅助索引	62
3.4 B树索引	64
3.4.1 B ⁺ 树的结构	64
3.4.2 B ⁺ 树上的查询	66
3.4.3 B ⁺ 树的维护	67
3.4.4 B ⁺ 树的效率	71
3.4.5 B ⁺ 树的应用	72
3.5 散列索引	72
3.5.1 动态散列索引	74
3.5.2 动态散列索引与其他索引的比较	77
3.6 多维索引	77
3.6.1 R树	79
3.6.2 网格文件	83
3.6.3 位图索引	85
3.7 小结	87
3.8 习题	88
参考文献	90

第 4 章 查询处理及优化技术	92
4.1 查询处理过程概述	92
4.1.1 语法分析及语法树	93
4.1.2 逻辑查询计划的生成	96
4.1.3 物理查询生成	99
4.2 查询代价的测量方法	101
4.3 关系代数的基础算法	102
4.3.1 基于扫描的算法	102
4.3.2 基于排序的算法	103
4.3.3 基于散列的算法	116
4.3.4 基于索引的算法	120
4.4 查询表达式的执行	122
4.4.1 实体化方法	123
4.4.2 流水线方法	123
4.5 查询优化技术	126
4.5.1 运算结果信息的统计	126
4.5.2 等价规则及逻辑查询优化	130
4.5.3 物理查询计划的生成	143
4.5.4 物化视图及其在优化中的应用	150
4.6 小结	153
4.7 习题	155
参考文献	159
第 5 章 事务及并发控制	161
5.1 事务	161
5.1.1 事务的概念	161
5.1.2 事务的状态	164
5.1.3 事务正确执行的准则	165
5.1.4 事务管理器	165
5.2 并发调度及可串行化	166
5.2.1 并发调度	167
5.2.2 可串行化	168
5.2.3 冲突可串行化的判断	173
5.2.4 冲突可串行化的构造	174
5.2.5 可接受调度的标准	175
5.3 并发执行产生的问题	176
5.3.1 丢失修改	177
5.3.2 不可重复读	177

5.3.3 脏读·····	178
5.3.4 幻像·····	178
5.4 并发控制的锁机制·····	179
5.4.1 锁·····	180
5.4.2 两阶段锁协议·····	183
5.4.3 活锁与死锁·····	185
5.4.4 死锁处理·····	186
5.4.5 更新锁和增量锁·····	188
5.4.6 多粒度锁·····	191
5.4.7 幻像问题的处理·····	193
5.4.8 数据库中锁调度器的结构·····	194
5.5 并发控制的时间戳机制·····	197
5.5.1 时间戳·····	197
5.5.2 时间戳排序协议·····	197
5.5.3 时间戳与封锁协议的比较·····	200
5.6 并发控制的有效性检查机制·····	200
5.7 事务的隔离级别·····	202
5.8 小结·····	203
5.9 习题·····	203
参考文献·····	206
第6章 数据库故障与恢复·····	209
6.1 有关事务访问数据库的进一步讨论·····	209
6.1.1 数据访问·····	209
6.1.2 事务的原语操作·····	210
6.2 数据库故障类型·····	211
6.2.1 事务故障·····	211
6.2.2 系统故障·····	211
6.2.3 介质故障·····	212
6.2.4 灾难性故障·····	212
6.3 基于日志的恢复技术·····	213
6.3.1 基于 undo 日志的恢复·····	214
6.3.2 基于 redo 日志的恢复·····	220
6.3.3 基于 undo/redo 日志的恢复·····	225
6.4 介质故障的恢复·····	228
6.4.1 静态转储·····	228
6.4.2 非静态转储·····	228
6.5 小结·····	231
6.6 习题·····	232

参考文献	234
第 7 章 数据库系统结构	236
7.1 集中式数据库系统	236
7.2 客户/服务器系统	238
7.3 并行数据库系统	242
7.3.1 并行数据库系统的目标	244
7.3.2 并行数据库硬件体系结构	244
7.4 分布式数据库系统	248
7.4.1 分布式数据库系统的体系结构	248
7.4.2 分布式数据库系统使用的网络类型	249
7.4.3 分布式数据库系统的目标	250
7.4.4 分布式数据库系统的实现问题	251
7.5 小结	252
7.6 习题	253
参考文献	253
第 8 章 分布式数据库系统及其设计	255
8.1 分布式数据库系统简介	255
8.1.1 产生和发展	255
8.1.2 分布式数据库系统的定义及类型	258
8.1.3 分布式数据库系统的模式结构	262
8.1.4 分布式数据库管理系统	268
8.1.5 需要研究的技术问题	270
8.2 分布式数据库系统的设计	271
8.2.1 分布式数据库系统设计的内容及目标	271
8.2.2 分布式数据库系统的设计方法	273
8.2.3 数据的分片策略	274
8.2.4 数据的分配策略	279
8.2.5 自顶向下的设计——DATAID-D	281
8.2.6 自底向上的设计	291
8.3 小结	293
8.4 习题	294
参考文献	294
第 9 章 分布式查询及优化	295
9.1 分布式查询概述	295
9.1.1 分布式查询的概念	295
9.1.2 分布式查询的层次结构	295

9.1.3 分布式查询的代价估计及优化准则	297
9.2 基于等价变换的分布式查询优化策略	299
9.2.1 基本原理	299
9.2.2 实现方法	299
9.3 基于半连接算法的查询优化处理	302
9.3.1 基本概念	302
9.3.2 利用半连接运算实现连接运算的基本原理	303
9.3.3 基于半连接算法的代价估计	303
9.4 基于站点依赖信息的连接算法优化处理	304
9.5 基于分片和复制的优化处理	306
9.6 站点依赖与复制结合的优化处理	308
9.7 利用 Hash 划分实现连接依赖	309
9.8 小结	310
9.9 习题	310
参考文献	311
第 10 章 分布式事务管理及故障恢复	313
10.1 分布式事务概述	313
10.1.1 分布式事务的概念	313
10.1.2 分布式事务的性质	314
10.1.3 分布式事务的执行原理	315
10.1.4 分布式事务管理的目标及关键问题	317
10.1.5 分布式事务管理的抽象模型	318
10.1.6 分布式事务管理的控制模型	318
10.2 分布式数据库系统的故障及恢复机制	320
10.2.1 分布式数据库系统中的故障	320
10.2.2 分布式事务的状态	321
10.2.3 分布式事务日志及恢复机制	322
10.2.4 两阶段提交协议	323
10.2.5 两阶段提交协议及故障恢复	331
10.2.6 三段式提交协议	332
10.3 分布式数据库一致性保持方法	334
10.3.1 多站点数据更新存在的问题	335
10.3.2 主文本更新法	335
10.3.3 快照法	336
10.3.4 异步复制器	336
10.4 小结	337
10.5 习题	338
参考文献	338

第 11 章 分布式数据库中的并发控制	339
11.1 分布式并发控制及可串行控制理论扩展	339
11.2 分布式并发控制的方法及分类	340
11.3 分布式并发控制的锁机制	341
11.3.1 分布式数据库系统的封锁方法	341
11.3.2 两阶段封锁协议的实现方法	342
11.3.3 分布式数据库系统中的死锁处理	344
11.4 分布式并发控制的乐观方法	348
11.5 小结	350
11.6 习题	350
参考文献	351

第 1 章

数据库及其基本理论

1.1 数据库技术概述

当今社会,数据库技术已成为先进信息技术的重要组成部分,是现代计算机应用系统的基础和核心,支撑着人们的生活、工作和学习,从票务管理、银行账户、网络购物、科学研究到信息的搜索,几乎每一项业务都离不开现代信息系统的处理和计算。

数据库技术最初产生于 20 世纪 60 年代中期,特别是到了 20 世纪 60 年代后期,随着计算机管理数据的规模越来越大,以及应用越来越广泛,数据库技术也在不断地发展和提高。第一个商用数据库系统出现于 20 世纪 60 年代末,其来自于文件系统,继承了文件系统的优点,如可以长期存储数据,允许大量存储数据,允许对数据进行查询等。但文件系统的缺点是数据组织方式不统一、没有专用的查询语言、数据维护困难及不支持用户的并发访问。数据库技术以解决文件系统的缺点为任务,展开了以数据模型为核心的一系列相关技术的研究,先后经历了第一代的网状、层次数据库系统,第二代的关系数据库系统,第三代的以面向对象模型为主要特征的数据库系统等。数据库技术的核心思想是利用统一的数据结构组织数据,利用高效的查询语言获取数据,利用有效的机制控制数据库系统的稳定运行。而这些功能的实现,都要通过数据库管理系统(Database Management System,DBMS)这一款软件。因此数据库技术发展的先进性最终体现在数据库管理系统的有效性上,数据库应用系统的性能大具部分体现在数据库设计的优劣及所使用的 DBMS 性能是否利用得充分。本书将着重介绍数据库管理系统中的用于进行数据管理和检索的核心技术,从而让读者对数据管理技术的实现机制有清晰的认识和深刻的理解,为其以后从事数据管理领域的工作奠定理论基础。

1.1.1 数据模型

数据模型是数据库技术的核心,数据库涉及的所有技术,包括数据的组织、存储、获取、展示,数据库运行时的故障处理及并发控制,均以数据模型为基础。每一款 DBMS 都是基于某种数据模型的。

数据模型简单地说是数据的组织方式,人们为了认识事务,经常对其进行特征抽象,并将这些特征组织成一定的结构,以便于保存和进行处理。但严格来讲,数据模型必须能描述事物的静态、动态特性,以及完整的约束条件,因此其通常包括以下 3 个要素。

(1) 数据结构: 即描述事物特征的数据的组织方式, 用于刻画事物的静态特征。

(2) 数据操作: 指以数据结构为基础, 对特征数据进行操作的集合, 包括各种操作及操作规则, 是事物动态特征的描述。

(3) 数据的约束条件: 指数据模型中限制数据之间的依存和制约规则, 用于保证数据的正确、有效、相容。

在数据库领域中, 数据模型主要分 3 个层次: 概念模型、逻辑模型和物理模型。概念模型主要用于信息世界的建模, 是对现实世界的第一层抽象, 是数据库设计人员与用户进行交流的语言和工具, 因此它更简单、清晰、易于理解, 着重于语义的表达, 并且不依赖于某一个 DBMS。在应用中, 概念模型的表达方法有许多, 其中最为著名的是实体-联系模型(Entity-Relationship), 采用 E-R 图来描述现实世界。逻辑模型是计算机能够处理的数据模型, 具体来说就是某一 DBMS 所支持的数据模型。由于将现实世界中的数据直接抽象成逻辑模型比较复杂, 甚至很困难, 所以人们常常首先将现实世界抽象为信息世界, 建立概念模型, 然后将概念模型转换为逻辑模型。物理模型用于描述数据在物理存储介质上的存储结构和存储方法。如数据库中数据按什么样的顺序存储, 索引采用 B⁺ 树结构还是散列结构, 数据的物理记录格式是变长的还是定长的, 数据是压缩的还是非压缩的等。物理模型不但与具体的 DBMS 有关, 而且与操作系统、计算机硬件密切相关。每一种逻辑数据模型在实现时都有对应的物理数据模型。而且 DBMS 为了保证其独立性与可移植性, 其物理数据结构一般都向用户隐蔽, 大部分物理数据模型的实现工作由系统自动完成, 设计者只负责分配数据存储空间、设计索引类型等, 不需要了解详细细节。

数据库的发展集中表现在逻辑数据模型的发展上。最初采用的逻辑数据模型是层次数据模型和网状数据模型, 直到 1970 年, IBM 公司 San Jose 研究室的研究员 E. F. Codd 发表了题为“大型共享数据库数据的关系模型”论文, 提出了数据库的关系模型。关系模型的提出, 是数据库发展史上具有划时代意义的重大事件, 开创了数据库关系方法和关系数据库理论的研究, 自此数据库技术产生了巨大的飞跃。20 世纪 70 年代是关系数据库理论研究和原型开发的高峰时代, 其中以 IBM San Joes 研究室开发的 System R 和 Berkeley 大学研制的 INGRES 为典型代表, 该时期的主要研究成果包括:

(1) 对关系模型的理论基础进行完善, 包括函数依赖、多值依赖、连接依赖及范式等, 给出了人们一致接受的关系模型规范说明, 从而为关系数据库的设计给出了理论指导。

(2) 对关系模型的操作。对关系代数、关系演算等进行研究, 设计了丰富的关系操作规则, 并在此基础上开发了关系查询语言 SQL 及 QBE, 为后来关系数据库语言的标准化打下了基础。

(3) 研制了大量的关系数据库管理系统(RDBMS), 攻克了系统实现中的查询优化、并发控制、故障恢复等一系列关键技术, 既丰富了数据库理论又促进了产品的成熟及广泛应用。

以关系模型为基础的关系数据库系统在 20 世纪 70 年代到 80 年代期间从实验室走向了社会, 为企事业信息化管理提供了强大的支持。

然而, 20 世纪 80 年代后期, 随着数据库应用领域对数据库需求的增多, 传统的关系数据模型开始暴露出许多弱点: 对复杂数据的表示能力差、语义表达能力弱、对复杂数据的处理能力弱等。为了使数据库用户能够直接以他们对客观世界的认识方式来表达他们所要描述的世界, 人们提出并开发了许多新的数据模型。这些尝试是沿着如下几个方向进行的。

1) 对传统的关系模型进行扩充

对传统的关系模型引入少数构造器,使其能够表达比较复杂的数据模型。其扩充分为两种形式:一种是结构上的扩充,使关系模型能够进行嵌套,即通过表中表表达复杂的结构;另一种是对语义的扩充,如关系上可以定义函数或运算符等。U. C. Berkeley 大学研制的 POSTGRES 即是通过语言扩充实现的一种数据管理系统。

2) 面向对象的数据模型

面向对象的数据模型也称对象数据模型,吸收了面向对象程序设计方法学的核心理念和基本思想,通过封装、继承、多态等来描述现实世界实体的逻辑组织、对象间依赖、联系等。对象模型具有丰富的语义,可描述对象的语义特征,包括对象的命名和标识、对象间的联系、对象的层次结构及继承和多态等。但由于该模型实现技术比较复杂,目前还没有成熟的、被广泛认可的产品。

3) 对象关系数据模型

在关系模型的基础上扩展了对象数据模型的某些特征。目前,许多著名的关系数据库产品,如 Oracle、SQL Server 等均扩展了对对象数据模型的支持,提供了对复杂数据管理和应用的需求。SQL99 中也提供了对关系数据库的数据类型的扩展,如增加了 LOB、BOOLEAN、ARRAY、DISTINCT 类型等。最重要的是扩展了对象数据类型:行类型(ROW TYPE)、抽象数据类型(Abstract Data Type)。

4) XML 数据模型

XML 是一种文档标记语言,用于对网页及其结构进行描述。随着 Web 应用的迅速发展和快速普及,基于网页数据的信息检索、信息处理及 Web 数据的存储均成为研究的热点问题,XML 数据模型便应运而生。XML 数据模型是一种自描述的、不规则的树状结构模型。每个 XML 模型有一个根结点,若干个中间结点和叶结点,每个结点用唯一的对象标识符表示。XML 中的元素是有序的,除此之外,XML 中还包含其他内容,如处理指令、注释、实体、CDATA、文档类型定义等。到目前为止还没有公认的 XML 数据类型,W3C 已经提出的 XML 数据模型有 XML Information Set、XPath 1.0 Model、DOM Model 和 XML Query Data Model。这 4 种模型中,XML Query Data Model 是比较完全和研究得比较多的一种。

5) 半结构数据模型

半结构数据模型用于描述半结构或无结构数据,该类数据模型主要有两种描述形式:基于逻辑的描述形式和基于图的描述形式。基于逻辑的描述方法有描述逻辑(description logic)、一阶逻辑(first-order logic)和 Datalog 规则。典型的代表是 AT&T 实验室的 Information Manifold 系统。采用图方式描述半结构化数据模型的代表有 OEM(Object-Exchange Model)数据模型,由 Standford University 的 TSIMMIS 项目组提出,应用于 Lore 半结构化数据库管理系统,用于存储从半结构化网页中提取出来的信息。

1.1.2 数据库管理系统

数据库管理系统(Database Management System,DBMS)是用于科学地组织和存储数据,高效地获取和维护数据的软件系统。其运行于用户和操作系统之间,包括以下核心功能。