



信息科学技术学术著作丛书

实时数据库系统

刘云生 著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

信息科学技术学术著作丛书

实时数据库系统

刘云生 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者三十多年来从事数据库理论与实现技术研究,尤其是现代(非传统)DBMS开发成果的总结,其特点是内容全面、视野开阔、系统完整、理论结合实践。全书共14章,主要内容有:①实时应用特征、实时数据库的概念与发展;②实时数据库的特征、实时数据模型、系统结构及RTDBMS;③实时事务的概念、模型、特性,事务优先级分派与调度策略、并发控制理论与技术及其正确性;④实时数据库的存储结构与存取方法,实时内存数据库及内外存数据交换技术,实时数据库故障恢复;⑤主动实时数据库系统的原理、组织结构与实现技术;⑥主动实时内存数据库系统实例ARTs-DB的设计与实现。

本书适合作为大专院校计算机、软件、自动控制、电子信息、电气工程及相关专业的学生尤其是研究生的教材,亦可供从事工程实现、过程控制、实时处理等领域的科研与工程实践工作的技术人员,以及国防领域的相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

实时数据库系统/刘云生著. —北京:科学出版社,2012.6

(信息科学技术学术著作丛书)

ISBN 978-7-03-034351-2

I. ①实… II. ①刘… III. ①实时数据库-数据库系统-研究
IV. ①TP311.132

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第098580号

责任编辑:孙 芳 / 责任校对:林青梅

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年6月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012年6月第一次印刷 印张:24 1/4

字数:465 000

定价:70.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息科学技术学术著作丛书》序

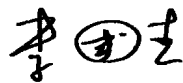
21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代,一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起,悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展;如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的新动力;如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇,提升我国自主创新和可持续发展的能力?这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台,将这些科技成就迅速转化为智力成果,将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

《信息科学技术学术著作丛书》是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上,经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术,微电子、光电子和量子信息技术,超级计算机、软件和信息存储技术,数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业,低成本信息化和用信息技术提升传统产业,智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学,信息科学基础理论,信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强,具有一定的原创性;体现出科学出版社“高层次、高质量、高水平”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版,能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时,欢迎广大读者提出好的建议,以促进和完善丛书的出版工作。

中国科学院计算技术研究所所长



前 言

数据库可以算是一门新兴的学科,从它诞生至今不过四十余年,但数据库技术应该是当前发展最快、最成功、最受人关注、应用最广泛的科学技术之一。国际数据库领域一直很活跃,而国内数据库事业在广大业界同行们的不懈努力下,更显得兴旺、发达,研究与学术交流活动热火朝天,从而推动着数据库学科快速发展,新的理论、技术与应用不断涌现。值此数据库的春雨时节,实时、主动、时态、内存等“非传统”数据库(相对地,以层次、网状、关系型为代表的数据库可称为传统数据库)这些“好花”乃发生,并茁壮成长为数据库百花园中的一枝奇葩。对于这种非传统事务型应用及其数据库,国际上通常冠之以“advanced”,但将其翻译成“高级的”或“先进的”似乎也不合适,故相对于那些以三大经典(层次、网状、关系)模型为代表的传统数据库而言,作者姑且称之为“现代数据库”(advanced database)或许更好。

数据库作为现代信息系统的核心与基础,在传统的商业、管理和行政的事务型应用领域已经成功使用并大量普及;而随着现代信息社会的发展,那些工程、生产和控制的过程,以及时间关键型领域或实时型应用领域也迫切要求使用数据库系统。但传统的数据库系统,尤其是关系数据库系统的目标主要是为了决策支持,基本属于 OLTP(on-line transaction process,联机事务处理)和 OLAP(on-line analysis process,联机分析处理)的范畴,它们对支持传统商务和管理的事务型应用是有效而成功的,不过面对过程控制、实时或时间关键的工程型应用的新要求与挑战,却显得无能为力。

像工厂自动化或 CIMS(computer integrating manufacture systems,计算机集成制造系统)、过程控制系统、实时仿真系统、机器人系统、实时数据处理系统,航天测控、空中交通管制、海洋探测、石油化工工程及通信、电力、智能交通等公用工程,各种武器系统及国防军事应用等,这种“现代”(非传统)应用具有共同的特性:既管理大量共享数据并维护其一致性,又进行实时处理。所以,支持这种类型的应用,必须要“紧密融合”(seamlessly integrated)数据库与实时处理两种技术的系统,而这正好就是“实时数据库”(real-time database,RTDB)系统。

作者是我国最早一代进行数据库工作的科研人员,本书正是作者三十多年来从事数据库理论与实现技术学习、研究和探索的心得体会,是自 20 世纪 80 年代中后期以来进行现代(非传统)数据库管理系统,尤其是实时数据库、时态数据库、主动数据库、内存数据库及其集成 DBMS(database management system)的研发与

实践成果的总结,它基于一个完全自主研发的主动实时内存数据库系统 ARTs-DB 的设计与实现全过程,系统全面地讨论了实时数据库理论与技术,并最后作为实例完整地介绍了 ARTs-DB 系统。

本书的主要内容几乎全部都在各种学术期刊正式发表过,具体内容包括:

(1) 实时数据库的发展,包括第 1、2 章。主要介绍实时应用及实时系统特征,它们对实时数据库系统的要求,实时数据库的概念及与传统数据库的比较。

(2) 实时数据库系统基础,包括第 3~5 章。讨论实时数据库的主要特征、实时数据模型和系统结构;实时数据库管理系统(real-time database management system, RTDBMS)的功能特性、组成结构及主要实现技术。

(3) 实时事务模型,包括第 6、7 章。主要叙述实时事务的概念、特性、结构、类型,实时事务处理的一般模型、任务、正确性及其准则。

(4) 实时事务处理,包括第 8、9 章。主要讨论实时事务的优先级分派与调度、并发控制的理论与技术。

(5) 实时数据库的存储数据管理,包括第 10~12 章。主要讨论实时数据库存储结构与存取方法;实时 I/O 调度、缓冲区管理;实时内存数据库技术、内外存数据交换策略;实时数据库故障恢复。

(6) 主动实时数据库及其实现,包括第 13、14 章。主要介绍主动性与实时性的关系、主动实时数据库系统的原理、功能组织、体系结构与实现技术;一个主动实时数据库系统实例 ARTs-DB 及其设计与实现。

本书可说是作者一生精力的研究成果与学习总结,希望能对实时数据库的概念、基本原理与基础理论,系统的结构及实现技术与方法作一系统全面的介绍,基于此宗旨,故本书具有下列特色:

(1) 内容全面。包括了实时数据库系统的基础理论、功能结构、设计方法、实现技术,由底向上形成一个完整的实时数据库知识层次体系结构。

(2) 视野开阔。从应用的立场、分析的方法、实现的角度阐述了实时数据库系统“是什么”、“为什么”、“如何实现”及“如何使用”,使读者既能“知其然”,又能“知其所以然”,还懂得“如何做”。

(3) 系统完整。从基本原理、实现技术、性能分析、应用支持等多方面对实时数据库进行了全面的论述,并提供了一个系统的研究与学习实时数据库的方法体系,因此它广泛适合于各个方面、各种类型的相关读者,尤其是相关的专业技术人员。

(4) 理论结合实践。不仅系统、深入地叙述了实时数据库系统的理论,而且所有的论述几乎都是基于真实具体的研究成果进行的,最后给出了一个实用、完整的主动实时内存数据库系统实例 ARTs-DB。

在本书出版之际,要感谢的人很多,尤其是本研究实验室的老师,历届的博士

研究生、硕士研究生,他们为本书的研究成果付出过辛勤的劳动,在此无法一一列出姓名,仅一并表示感谢!还要特别感谢我的妻子曹诗珍教授,她为本书的出版作出了巨大的牺牲与贡献,哪怕在大病尚未痊愈时,还给予我关爱、支持与帮助,在此发自内心地表示诚挚感谢!

诚如前面所说,书中内容是作者的学习、研究与实践开发的体会,尽管几乎都曾在相关杂志正式发表,但由于作者水平与能力有限,书中的“我之管见”或“见仁见智”之说、不妥或不足之处,恐在所难免,切盼学术界同仁与各方读者不吝赐教。

劉雲生

2011年12月于武昌喻家山

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 实时数据库的发展	1
1.2 实时应用特征与要求	4
1.3 数据库与实时系统	7
1.4 传统数据库与实时数据库	8
第 2 章 实时系统基础	11
2.1 实时系统概述	11
2.2 实时系统模型	18
2.3 实时数据库系统模型	23
2.4 实时调度	24
2.5 通信与同步	26
2.6 系统负载	29
第 3 章 实时数据库特征与技术	30
3.1 实时数据库的时间	30
3.2 实时数据特征	31
3.3 实时事务定时性	34
3.4 系统运行特征	37
3.5 实时数据库主要技术	39
第 4 章 实时数据模型	43
4.1 实时数据表示	43
4.1.1 时间表示	43
4.1.2 数据与时间的关系	44
4.1.3 实时数据结构	45
4.2 实时数据对象	46
4.2.1 映像对象	47
4.2.2 导出对象	47
4.2.3 不变对象	48
4.3 时间一致性限制	48

4.4	时间限制	50
4.5	实时关系代数	52
4.6	E-R-T 模型	54
第 5 章	实时数据库管理系统	59
5.1	概述	59
5.2	RTDBMS 的功能特性	61
5.3	RTDBMS 的系统模型	62
5.4	RTDBMS 的系统结构	64
5.5	RTDBMS 执行模型	68
5.6	RTDBMS 的特殊问题	70
第 6 章	实时事务	75
6.1	实时事务语义	75
6.2	现代事务模型	78
6.2.1	现代事务模型的特征	78
6.2.2	分段事务	79
6.2.3	链式事务	80
6.2.4	分裂与合并事务	81
6.2.5	多层事务	81
6.2.6	嵌套事务	82
6.2.7	长寿事务	83
6.2.8	合作事务	85
6.3	嵌套实时事务	88
6.3.1	动机	88
6.3.2	嵌套实时事务定义	89
6.3.3	嵌套实时事务处理规则	91
6.3.4	嵌套实时事务的内部依赖性	92
6.4	实时事务的特性	93
6.5	实时事务之间的相关性	95
6.5.1	数据相关性	96
6.5.2	结构相关性	97
6.5.3	行为相关性	98
6.5.4	时间相关性	98
6.6	实时事务的执行依赖性	101
6.6.1	基本依赖	101
6.6.2	复合依赖	103

6.6.3 依赖之间的关系	103
6.6.4 依赖的特性	105
6.7 实时事务的分类	107
第7章 实时事务处理	111
7.1 概述	111
7.1.1 实时事务处理体系结构	111
7.1.2 实时事务处理任务	112
7.1.3 实时事务处理过程	115
7.2 实时事务的状态变迁	116
7.2.1 实时事务管理原语	117
7.2.2 实时事务的状态	118
7.2.3 状态变迁	118
7.3 实时事务执行的经历模型	120
7.3.1 与实时事务相联的事件	120
7.3.2 经历	121
7.3.3 事务经历中事件的发生	124
7.4 实时事务的正确性	125
7.4.1 概述	125
7.4.2 结果正确性	125
7.4.3 行为正确性	126
7.4.4 结构正确性	128
7.4.5 时间正确性	129
7.5 实时事务并发的正确性标准	131
7.5.1 传统可串行化的局限性	131
7.5.2 非传统可串行化的正确性标准	132
7.6 性能指标	135
第8章 实时事务调度	138
8.1 概述	138
8.1.1 实时事务调度概念	138
8.1.2 实时事务调度参数	139
8.1.3 实时调度目标	141
8.1.4 实时调度分类	142
8.2 实时事务截止期指派	146
8.3 实时事务优先级分派	149
8.4 静态表驱动调度	154

8.5	速率单调调度	156
8.5.1	典型算法	156
8.5.2	扩展研究	158
8.5.3	截止期单调调度	160
8.6	基于截止期的调度	160
8.6.1	DEDF 调度	161
8.6.2	AEDF 调度	163
8.6.3	AEUDF 调度	164
8.7	基于紧迫性的调度	165
8.7.1	LSF 调度	165
8.7.2	LASF 调度	165
8.8	基于价值的调度	166
8.8.1	CDVD 调度	167
8.8.2	VBED 调度	168
8.8.3	VHAED 调度	168
第9章	实时数据库的并发控制	171
9.1	引言	171
9.2	锁式实时并发控制	172
9.2.1	一般 2PL 算法评述	172
9.2.2	优先级 2PL 算法	174
9.2.3	优先级继承	175
9.2.4	有条件的优先级继承	176
9.2.5	数据优先级	177
9.3	时标排序	178
9.3.1	TO 基本原理	178
9.3.2	操作重叠与可恢复性问题	179
9.3.3	基于优先级的 TO	181
9.4	乐观并发控制	182
9.4.1	基本 OCC	183
9.4.2	OCC-BC	185
9.4.3	OCC-PA	185
9.4.4	OCC-PW	186
9.4.5	OCC-PW50	187
9.5	多影子并发控制	188
9.6	多版本并发控制	190

9.6.1	MVCC 的基本思想	190
9.6.2	MVCC-TO	191
9.6.3	2V2PL	191
9.6.4	MV2PL	194
9.7	ϵ -可串行化并发控制	195
9.8	δ -可串行性并发控制	202
9.9	Q -一致性可串行化并发控制	204
第 10 章	实时内存资源管理	208
10.1	超载控制	208
10.1.1	超载的后果	208
10.1.2	超载控制	209
10.1.3	接纳控制	211
10.2	实时内存分配	214
10.2.1	实时内存分配特征	214
10.2.2	实时内存分配方式	215
10.2.3	实时内存分配策略	216
10.3	实时磁盘 I/O 调度	218
10.3.1	实时事务 I/O 操作分析	218
10.3.2	实时 I/O 请求的特性	220
10.3.3	实时磁盘 I/O 调度算法	220
10.4	实时数据库缓冲管理	222
10.4.1	数据缓冲模型	222
10.4.2	实时缓冲区管理策略设计	223
10.4.3	P-LRU 算法	223
10.4.4	P-LRU-A 算法	225
10.4.5	P-LRU-I 算法	225
第 11 章	实时内存数据库管理	227
11.1	内存数据库概述	227
11.1.1	内存数据库的发展	227
11.1.2	MMDB 与 DRDB 的比较分析	228
11.1.3	内存数据库的关键问题	231
11.2	实时内存数据库定义	232
11.3	内存数据库组织	234
11.3.1	存储空间结构	234
11.3.2	物理数据组织	234

11.4	MMDB 的 Hash 存取方法	237
11.4.1	桶散布 Hashing	237
11.4.2	可扩展 Hashing	237
11.4.3	线性扩展 Hashing	239
11.4.4	多目录 Hashing	242
11.4.5	多层目录 Hashing	242
11.5	MMDB 的图式存取方法	243
11.5.1	内存数据库图	243
11.5.2	MM-DBG 的物理实现	245
11.5.3	MM-DBG 的维护	246
11.5.4	MM-DBG 的查询	247
11.5.5	MM-DBG 的性能分析	250
11.6	SB-树索引存取方法	252
11.6.1	内存索引结构分析	253
11.6.2	SB-树结构	253
11.6.3	SB-树的查找	254
11.6.4	SB-树的维护	255
11.6.5	性能分析	256
11.7	M-DB 的数据装入	259
11.7.1	数据装入的要素与原则	259
11.7.2	基于相亲度的数据装入	260
11.7.3	数据装入算法	264
第 12 章	实时数据库恢复	266
12.1	实时数据库恢复特征	266
12.2	实时数据库恢复原理	268
12.3	实时数据库恢复一般模型	272
12.4	实时恢复算法	276
12.4.1	PASLAR 算法	276
12.4.2	SENLAR 算法	278
12.4.3	PENLAR 算法	279
12.4.4	PEANLAR 算法	279
12.5	实时内存数据库恢复	280
12.5.1	RTMMDB 恢复结构模型	280
12.5.2	提交处理	281
12.5.3	记日志	282

12.5.4	RTMMDB 检验点操作	285
12.5.5	M-DB 重装	287
第 13 章	主动实时数据库	289
13.1	主动实时数据库概述	289
13.1.1	动机与应用要求	289
13.1.2	发展历史	290
13.1.3	主动机制的应用领域	291
13.1.4	集成主动机制到实时数据库	293
13.2	主动实时数据库概念	295
13.2.1	实时主动能力	296
13.2.2	实时主动机制	296
13.2.3	执行控制	299
13.3	ARTDB 的体系结构	299
13.4	实时事件	301
13.4.1	实时事件概念	301
13.4.2	事件的类型	303
13.4.3	事件的操作	305
13.4.4	事件表达式与复合事件	309
13.5	实时的事件探测	309
13.5.1	实时事件探测的特征	310
13.5.2	事件探测的一般模型	311
13.5.3	基本事件探测	313
13.5.4	时间事件探测处理	313
13.5.5	复合事件探测处理	314
13.6	实时触发器	319
13.6.1	实时触发器概念	319
13.6.2	状态条件及其评价	321
13.6.3	触发器活动	323
13.6.4	实时触发器的时间	326
13.7	实时触发器管理	327
13.7.1	触发器的管理	327
13.7.2	触发器执行模型	329
13.7.3	触发器控制流	330
第 14 章	主动实时内存数据库	332
14.1	ARTs-DB 的特征	332

14.2	ARTs-DB 的系统结构	332
14.3	ARTs-DBL 语言	335
14.3.1	ARTs-DBL 的数据说明	336
14.3.2	ARTs-DBL 的事务说明	337
14.4	ARTs-DB 的存储数据管理	338
14.4.1	ARTs-DB 的内存组织结构	338
14.4.2	ARTs-DB 的内存管理	339
14.4.3	ARTs-DB 内存数据库管理	341
14.4.4	ARTs-DB 内外存数据交换	342
14.5	三段式实时事务预处理	346
14.5.1	编译时静态预分析	347
14.5.2	初启时动态预分析	348
14.5.3	运行时动态预处理	349
14.6	ARTs-DB 事务调度	350
14.6.1	子事务说明	351
14.6.2	被触发事务的优先级分派	351
14.6.3	事务调度的 EED 算法	354
14.7	ARTs-DB 事务的互斥与同步	355
14.7.1	线程级互斥量	356
14.7.2	主-从式并发控制机制	356
14.7.3	实时事务的同步	361
参考文献		362

第 1 章 绪 论

数据库理论与技术的发展极其迅速,其应用日益广泛,在当今的信息社会中,它几乎无所不在。三大经典型(层次、网状、关系)数据库在传统商务和管理的事务型应用领域获得了极大的成功,然而它们在现代(非传统)的工程型、过程型或时间关键型应用面前却显得软弱无力,面临着新的严峻挑战,从而导致了所谓“现代数据库技术”即非传统数据库技术的产生与发展。其中,实时数据库就是最重要的现代数据库之一。

1.1 实时数据库的发展

一般,实时系统中的数据由应用任务各自以文件的形式单独进行管理。然而,随着社会和技术两方面的发展,许许多多的应用要求以“及时方式”(即按所要求的时间)处理并管理大量共享信息。自 20 世纪 80 年代开始,尤其是近年,社会的数字化信息呈爆炸式发展,新的过程与工程型、主动规则型、动态不确定型、时间关键型、高性能与非规范及超大规模等“现代应用”(advanced applications)不断涌现,而且随着现代社会信息化建设的推进,它们还会迅速地扩大。这就是说,大量的应用既是实时的,同时又是数据密集的,既要维护大量数据和应用的实时性,又要管理数据之间、应用之间及数据与应用之间的、带时间语义的彼此依赖关系。因此,在各种应用领域,数据再也不能以各自单独的形式被处理和进行管理,它已成为一种要求有效(尤其是“识时”的)管理技术与机制的、社会生存攸关的资源。与之同时,DBMS 当然也必须围绕这个理念,即将数据作为一种极其重要的社会资源来管理,这是其唯一目标。这就为“实时”与“数据”两者的结合奠定了基础,需要将 DBMS 中事务管理的原理与技术用于实时应用中的数据存储和操纵。但这并不是一个像说的那么简单的问题,它与传统的数据库和实时处理之间在概念、原理、技术和方法上都存在着根本性的区别,必须专门单独研究。

所谓“现代应用”,就是非传统应用,主要指 CAD/CAM(computer aided design/computer aided manufacture)、CIMS、实时过程控制、实时仿真、实时监控和预警、实时数据处理系统,电话交换、移动通信、电力调度与传输、网络管理,智能交通管理、空中交通管制、雷达跟踪、目标与环境特性识别,武器制导、各种车载、舰载和机载控制系统、C⁴I(computer, command, control, communication and intelligence)系统,实时的电子商务、电子金融、证券交易、智能楼宇和智慧家庭等

领域里的应用。这种应用与传统的事务型应用有着不同的基本特征,如下:

(1) 其应用活动(任务或事务)有很强的时间性要求或定时限制(timing constraints),要在规定的时刻和/或一定的时间内完成其处理,而且对于不同的应用,这种定时限制的性质还不一样,有的是“硬性”的,即绝对不能违反,否则将带来恶果,给系统造成大的危害,有的则是“软性”的,即允许有一定的超时。

(2) 各应用任务必须合作、协同计算,故各任务活动之间存在着多种类型的彼此相关性。

(3) 所处理的数据往往是实时的,即数据有“时标”(timestamp)和一定的“时间有效期”(validity time interval),过时则有新的数据产生,原数据就过时了,而作决策处理或数据推导一般都必须使用当前有效的数据。

(4) 实现其处理逻辑不仅需要各种领域数据,还需要支持合作、协同计算的控制信息,即要同时维护大量共享的应用数据和控制数据。

我们将层次、网状、关系模型为代表的数据库称为传统数据库,这种数据库系统,尤其是关系数据库系统的设计目标一般是为了 DSS(decision support system),是服务于 OLTP 和 OLAP 的,即它们都是适合于事务型应用领域的。具有上述特征的“现代应用”对数据库技术提出了新的挑战,面对这些应用的要求,传统数据库系统已无能为力,需要“现代数据库系统”(advanced database systems)的支持。传统应用及其数据库与现代应用及其数据库有很大的差别,可以归纳如表 1-1 中所示。

表 1-1 传统数据库与现代数据库的对比

比较指标	传统数据库	现代数据库
应用领域	商务 管理 行政	工程 控制 生产
应用类型	事务型	过程型、时间关键型
应用特征	类型、语义、结构简单且稳定 数据的结构与操作简单、稳定 数据和行为都与时间无关 数据库被动、单向驱动	类型、语义、结构复杂、动态变化 数据的结构与操作多样、变化 数据和行为都与时间紧密相联 有的要数据库主动、双向驱动
应用要求	数据正确 无定时性 行为的静态定义 常规操作处理	数据与时间正确 数据与事务有定时限制 行为的动态触发 非常规操作、实时处理