# 高级数据库技术

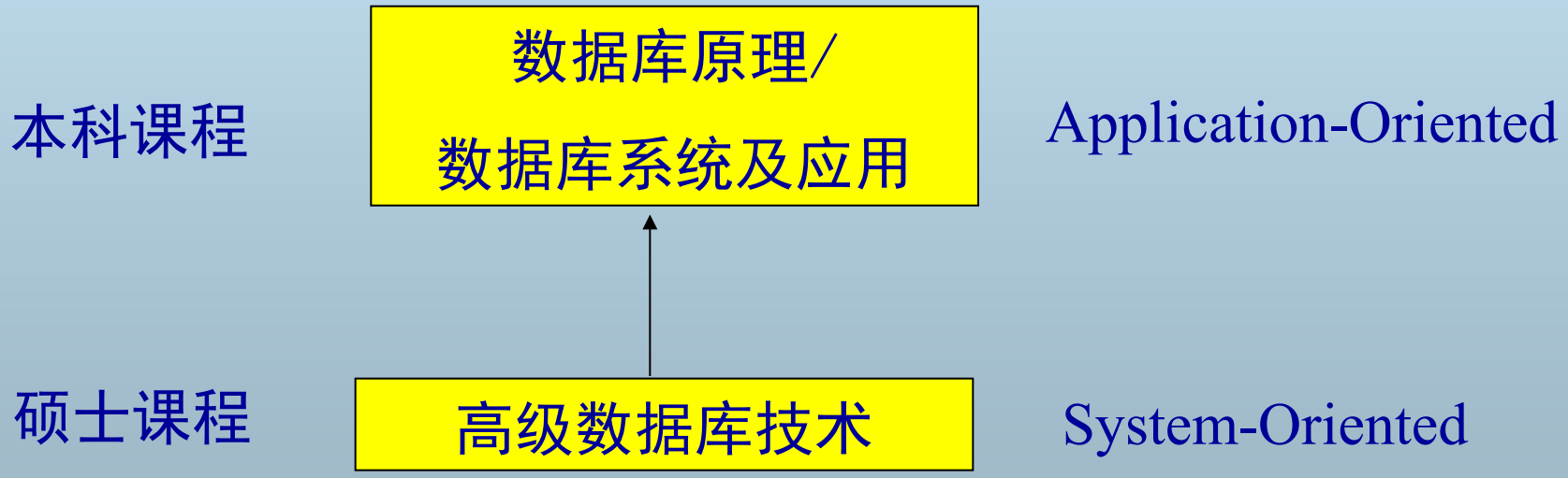
金培权

jpq@ustc.edu.cn

http://kdelab.ustc.edu.cn/~jpq

# 课程目的

- 掌握数据库设计和优化的方法
- 深入掌握DBMS的原理和技术
- 了解DBMS实现技术



# 课程内容

- **Part 1: Application-Oriented**
  - 关系数据库理论回顾
  - 数据库设计方法与案例分析
- **Part 2 : System-Oriented**
  - 数据库文件与系统结构
  - 索引结构
  - 查询处理
  - 缓冲区管理
  - 恢复
  - 锁与并发控制

# 课程安排

- 讲课＋实验
  - 50学时讲授，20学时实验
- 教材
  - Database System Implementation(2th) ,H. Garcia-Molina, J. Ullman, J. Widom. 机械工业出版社
- 参考文献
  - [R1] Raghu Ramakrishnan et al. Database Management Systems (Third Edition), McGraw-Hill & Tsinghua University Press, 2003
  - [R2] Abraham Silberschatz Henry F. Korth S. Sudarshan, Database System Concepts (Sixth Edition)，China Machine Press, 2012 （中文版，杨冬青 等译）
  - [R3] C. J. Date. An Introduction to Database Systems (Eighth Edition). China Machine Press, 2003 (中文版，孟小峰 等译. )
  - [R4] 金培权. 数据库系统及应用, 科学出版社, 2024

# 课程安排

- 考核
  - 期末考试50%
  - 到课10%
  - 作业20%：~6次作业
  - 实验20%：2个实验，独立完成
- 预备知识
  - 数据库系统原理，SQL，数据库应用编程

# 课程安排

- 上机软件
  - MySQL
  - Sybase PowerDesigner 16.x
  - C/C++
- 实验内容
  - 见课程主页。

**Grading**
Homework: 20%
Project: 20% [Lab Description]
Final Exam: 60%

**《高级数据库技术》课程实验**

说 明:

本课程共包括 2 个实验。

---

Lab 1:

根据下面的需求描述，使用SAP(Sybase) Power Designer 16.x设计相应的数据库概念模型，并转换成MySQL上的物理数据库结构。

某银行准备开发一个银行业务管理系统，通过调查，得到以下的主要需求:

银行有多个支行。各个支行位于某个城市，每个支行有唯一的名字。银行要监控每个支行的资产。 银行的客户通过其身份证号来标识。银行存储每个客户的姓名及其居住的街道和城市。客户可以有帐户，并且可以贷款。客户可能和某个银行员工发生联系，该员工是此客户的贷款负责人或银行帐户负责人。 银行员工也通过身份证号来标识。员工分为部门经理和普通员工，每个部门经理都负责领导其所在部门的员工，并且每个员工只允许在一个部门内工作。每个支行的管理机构存储每个员工的姓名、电话号码、 家庭地址及其经理的身份证号。银行还需知道每个员工开始工作的日期，由此日期可以推知员工的雇佣期。 银行提供两类帐户——储蓄帐户和支票帐户。帐户可以由2个或2个以上客户所共有，一个客户也可有两个或两个以上的帐户。每个帐户被赋以唯一的帐户号。银行记录每个帐户的余额 、开户的支行以及每个帐户所有者访问该帐户的最近日期。另外，每个储蓄帐户有其利率，且每个支票帐户有其透支额。 每笔贷款由某个分支机构发放，能被一个或多个客户所共有。每笔贷款用唯一的贷款号标识。银行需要知道每笔贷款所贷金额以及逐次支付的情况（银行将贷款分几次付给客户）。虽然贷款号不能唯一标识银行所有为贷款所付的款项，但可以唯一标识为某贷款所付的款项。对每次的付款需要记录日期和金额。

提交内容:

(1) 文档：设计报告（参考格式：adb-lab01-template.docx）,word/PDF均可。

(2) 原始设计文件，以及readme。

(3) 提交截至时间：**2025/04/15 12:00 PM**（北京时间），提交方式：等待助教通知

Lab 2：根据下面的 设计要求，实现一个Storage and Buffer Manager。

设计要求：buffer.pdf（单击链接下载）
验证用的trace文件：data-5w-50w-zipf.txt（单击链接下载）

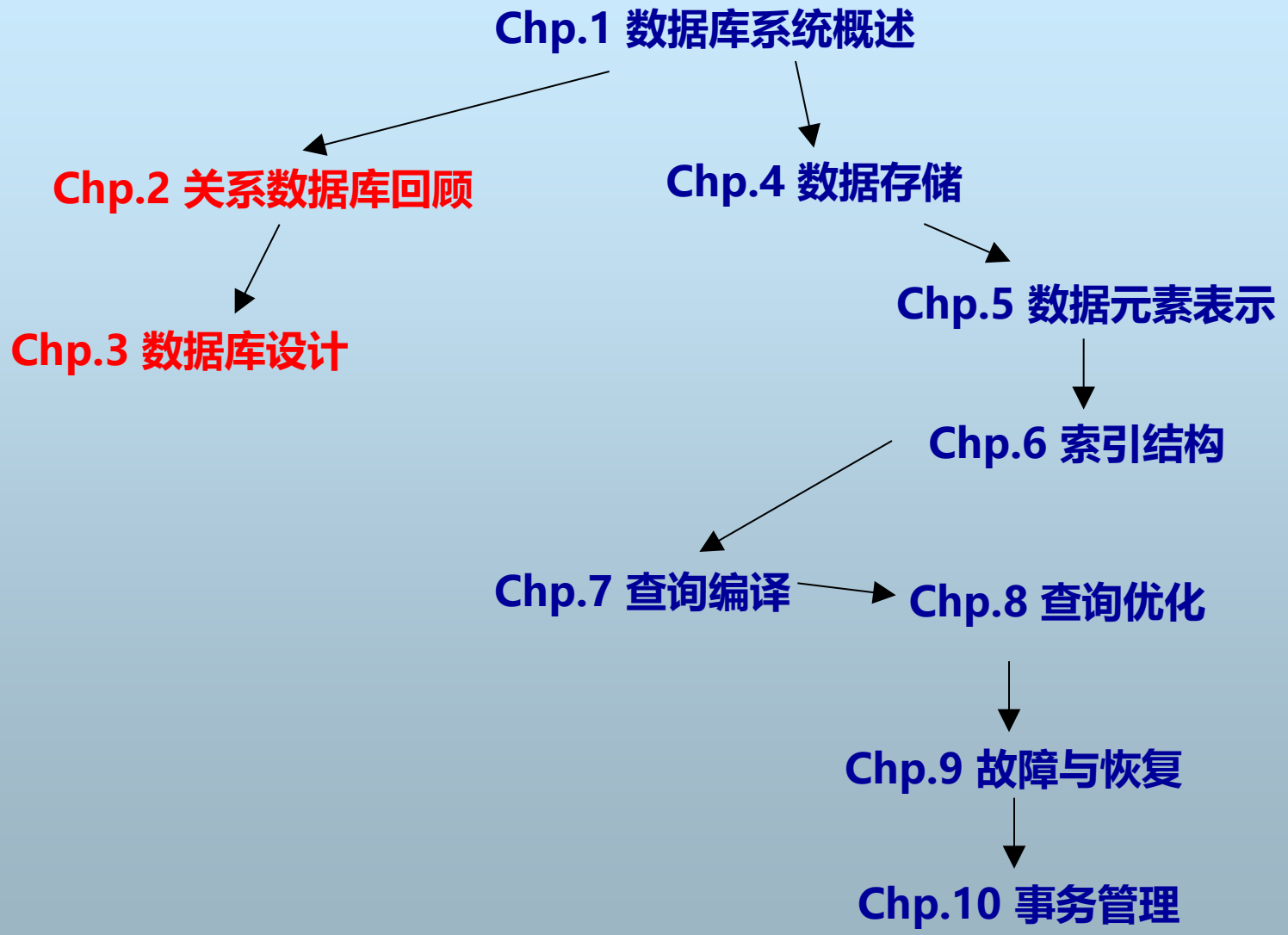
提交内容:

(1) 文档：提交一个说明文档，陈述你的设计和实现结果(包括设计结果、实现结果、运行结果等），格式pdf。

(2) 原始设计文件，以及readme。

(3) 提交截至时间：**2025/06/25 12:00 PM**（北京时间），提交方式：等待助教通知

# 课程知识结构


Chp.1 数据库系统概述
Chp.2 关系数据库回顾
Chp.3 数据库设计
Chp.4 数据存储
Chp.5 数据元素表示
Chp.6 索引结构
Chp.7 查询编译
Chp.8 查询优化
Chp.9 故障与恢复
Chp.10 事务管理

# 第1章 数据库系统概述



金培权（jpq@ustc.edu.cn）

# 主要内容

- 数据库系统的基本概念
- DBMS实现问题
- 数据库设计问题
- 数据库存取问题
- 数据库技术的发展

# 一、数据库系统的基本概念

- 数据
- 数据库
- 数据库模式
- 数据库管理系统
- 数据库系统

# 1、数据

- 数据(Data)是数据库中存储的基本对象
- 数据的定义
  - 人们用来反映客观世界而记录下来的可以鉴别的符号
- 数据的种类
  - 数值数据：0—9
  - 非数值数据：字符、文字、声音、图形、图像等

# 1、数据

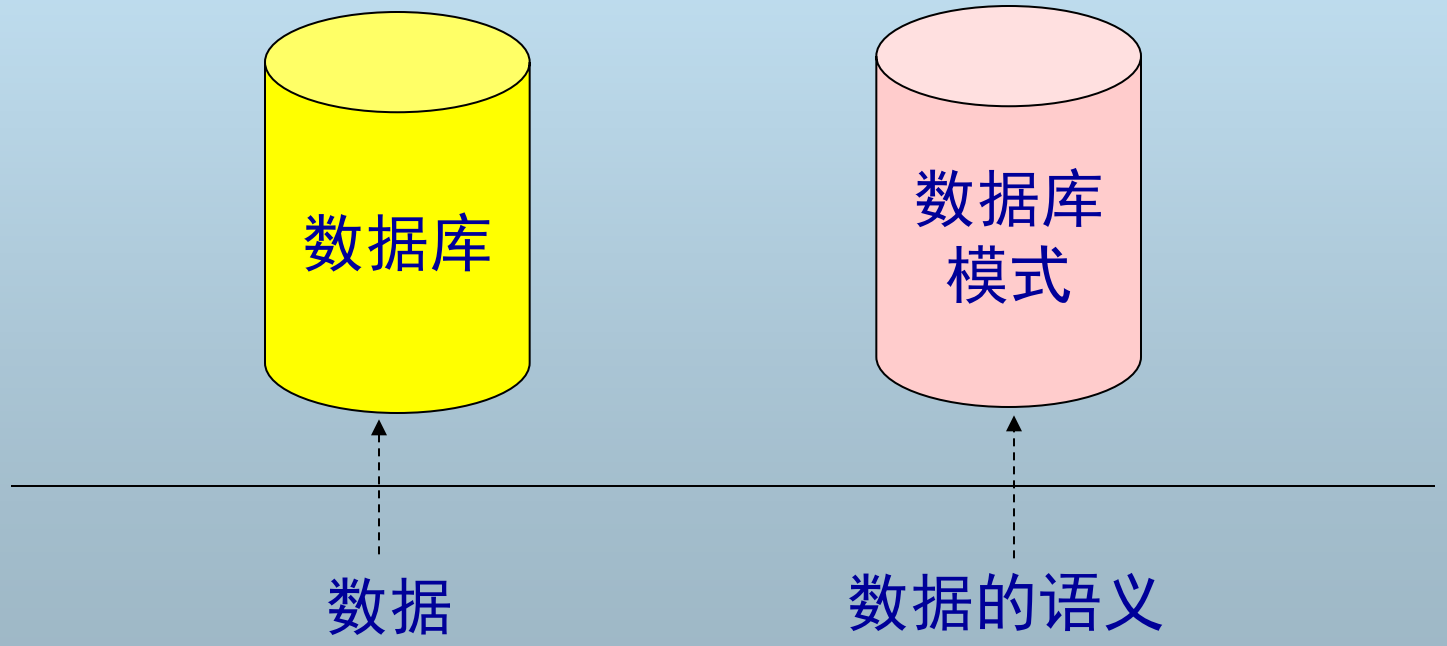
- 数据的特点
  - 数据与其语义是不可分的
- 例子1：93是一个数据
  - 语义1：学生某门课的成绩
  - 语义2：某人的体重
  - 语义3：软件学院2017级学生人数
- 例子2：档案记录（李明，197205，中国科大，1990）
  - 语义1：学生，出生年月，所在学校，毕业年份
  - 语义2：学生，出生年月，录取大学，入学时间

# 2、数据库

- 数据库的定义
  - 数据库(Database,简称DB)是长期储存在计算机内、有组织的、可共享的大量数据的集合
- 数据库的基本特征
  - 长期储存：持久存储，一般数据量比较大
  - 有组织的：数据按一定的数据模型组织、描述和储存
  - 可共享的：可为各种用户共享
  - 数据间联系密切，具有最小的冗余度和较高的独立性
  - 一个数据库一般服务于某个特定的应用
    - 例：图书数据库、航班数据库、银行数据库……

# 3、数据库模式 (Schema)

- 数据库模式是数据库中全体数据的逻辑结构和特征的描述



# 举例

| 学号 | 姓名 | 年龄 |
| --- | --- | --- |
| 001 | 张三 | 20 |
| 002 | 李四 | 21 |
| 003 | 王五 | 22 |

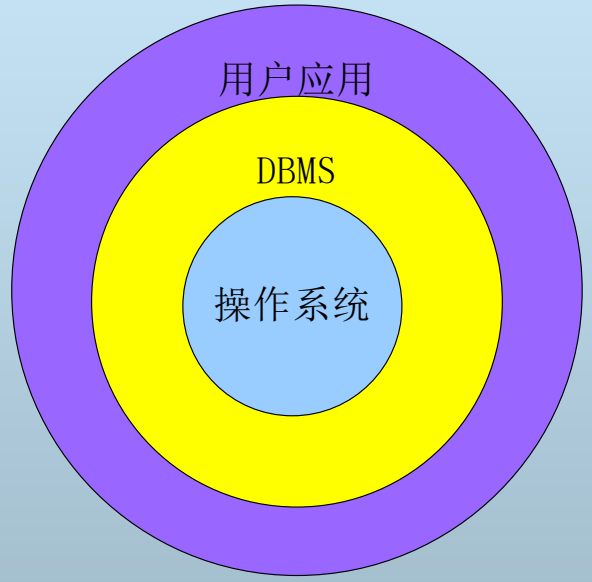
学生(学号:char,姓名:char,年龄:int)

模式

数据库

# 4、数据库管理系统

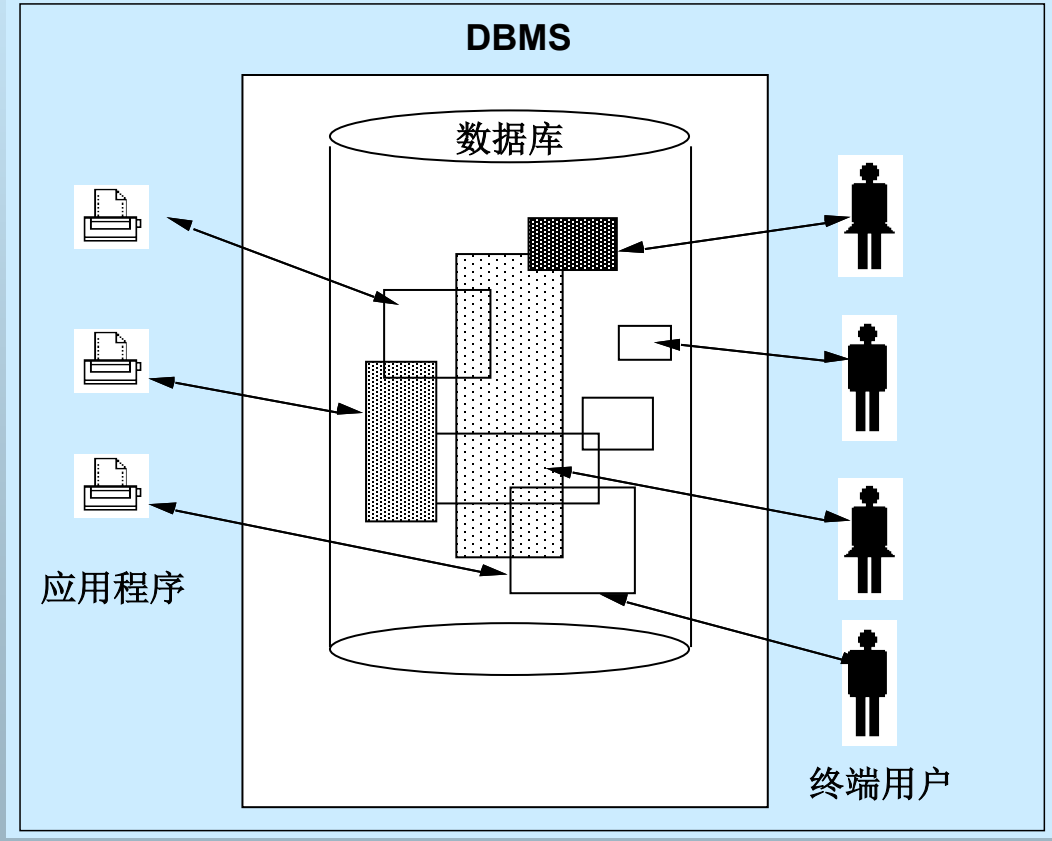
- **DBMS（Database Management System），是计算机程序的集合，用于创建和维护数据库**
  - 位于操作系统和用户应用之间
  - 总是基于某种数据模型



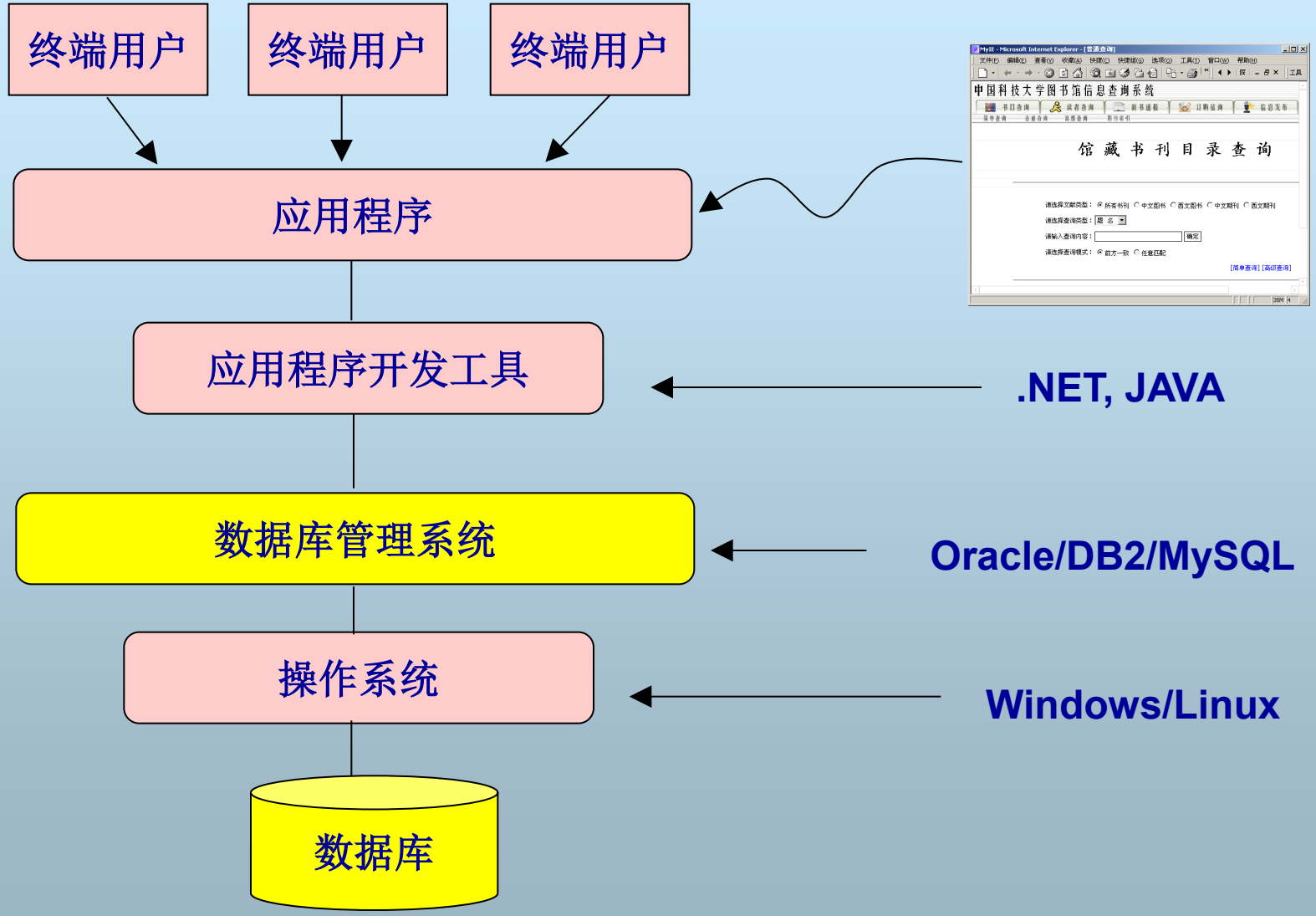

  - 数据库厂商的产品通常指DBMS
    - Oracle 12g
    - MySQL 5.7
    - MS SQL Server
    - IBM DB2、Sybase、Informix、PostgreSQL等

# 5、数据库系统

- DBS（DataBase System），指在计算机系统中引入了数据库后的系统，即采用了数据库技术的计算机系统



# 5、数据库系统


终端用户
终端用户
终端用户
应用程序
应用程序开发工具
数据库管理系统
操作系统
数据库
.NET, JAVA
Oracle/DB2/MySQL
Windows/Linux
中国科技大学图书馆信息查询系统
馆 藏 书 刊 目 录 查 询

# 6、数据库系统的特点

- 数据结构化
- 数据的共享性高，冗余度低
- 数据独立性高
- 数据由DBMS统一管理和控制

# 7、数据库系统中的三个主要问题

- 如何设计和实现一个DBMS来高效的组织和管理数据库？
  - ——DBMS实现问题
- 如何针对特定应用的需求设计一个合理的数据库结构？
  - ——数据库设计问题
- 应用程序如何有效地存取数据库中的数据？
  - ——数据库存取问题

# 二、DBMS实现问题

- Oracle、Informix、DB2、MS SQL Server、MySQL
  - 数据结构：关系
  - 数据操作：关系代数 & SQL
  - 存储：文件

# 1、一个虚拟的DBMS：Megatron2000

- UNIX下的关系型DBMS，支持SQL
- 实现细节
  - 关系通过文件（ASCII）存储，e.g. R存储在/usr/db/R中

```
Smith # 123 # CS
Jones # 522 # EE
```

  - 数据库模式存储在特定的文件（ASCII）中

```
R1 # A # INT # B # STR …
R2 # C # STR # A # INT …
```

# 2、Megatron 2000 使用示例

```
% MEGATRON2000
    Welcome to MEGATRON 2000!
&



& quit
%
```

# 2、Megatron 2000 使用示例

```
& select *
  from R #

   name    id     dept
   SMITH   123    CS

&
```

# 2、Megatron 2000 使用示例

```
& select A,B
  from R,S
  where R.A = S.A and S.C > 100 #

   A     B
 123   CAR
 522   CAT

&
```

# 3、Megatron 2000如何执行查询？

- 执行 “`select * from R where condition`”:
  - 读数据字典获取R的属性
  - 读R对应的文件，对于每一行数据:
    - 检查条件
    - 如果条件满足，则输出

# 3、Megatron 2000如何执行查询?

- 执行"`select A,B from R,S where condition`":
  - 读数据字典获取R和S的属性
  - 读R文件，对于每一行数据:
    - 读S文件，对于每一行数据:
      - 生成连接元组
      - 检查条件
      - 若条件满足，则输出

# Megatron 2000功能总结

- 可以定义表
- 可以进行数据操作
  - 数据更新
  - 数据查询

# 4、Megatron 2000 存在什么问题？

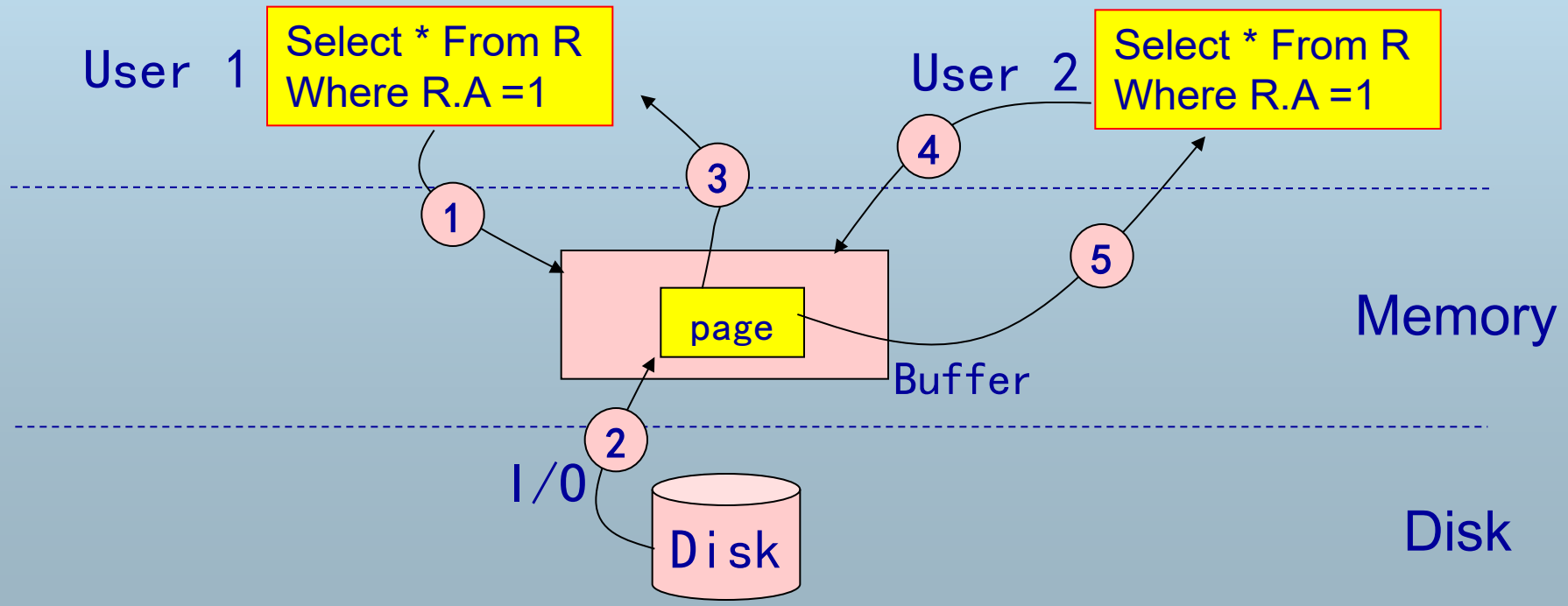
- 元组平铺在磁盘上
  - 将 ' EE'改为 ' ECON'，需要重写整个文件
  - ASCII存储过于昂贵
  - 删除操作同样代价很高

# 4、Megatron 2000 存在什么问题？

- 低级的查询处理
  - 例，
```
select *
from Student S,SC
where S.sno = SC.sno and SC.credit > 3
```
  - 先做连接比先做选择效率要低
  - 未考虑更高效的连接算法

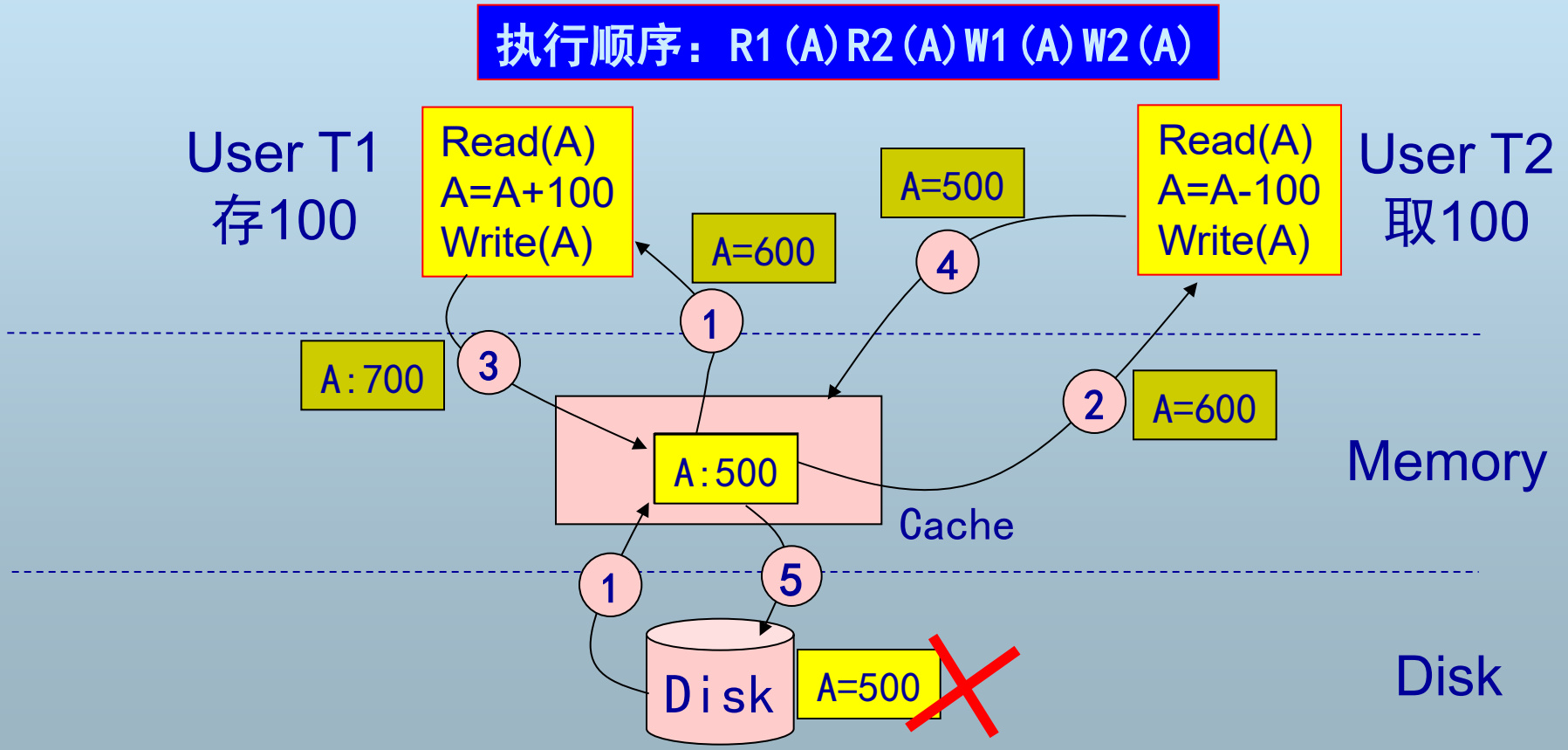
# 4、Megatron 2000 存在什么问题？

- 没有缓冲区管理
  - 数据直接从磁盘存取，磁盘I/O的代价昂贵
  - 需要Buffer来加速数据存取效率



# 4、Megatron 2000 存在什么问题？

- 没有并发控制
  - 多用户同时存取数据时数据一致性得不到保证



# 4、Megatron 2000 存在什么问题？

- 没有索引；数据查询效率低
  - 不能快速地根据给定键值查询元组
  - 总是要读入整个关系

若 page size = 8 KB，page I/O 10ms

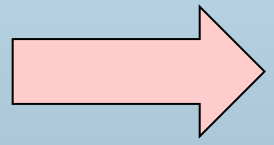
1 MB (128 pages)-----1.28 s
128 MB (16384 pages)-----163.8 s
1 GB (131072 pages)-----1310.7 s ≈21.8 min

# 4、Megatron 2000 存在什么问题？

- 没有可靠性
  - 发生数据库系统故障时没有恢复机制
  - 易出现数据不一致的情形

# 4、Megatron 2000 存在什么问题？

- 没有应用程序编程接口（API）
  - 应用如何存取数据库？
- 糟糕的数据字典组织



Megatron 2000完全不能满足实际应用的要求！

# 三、数据库设计问题

- 如何把现实世界数据表达到数据库系统中？
- 针对一个具体应用，应该如何构造一个适合的数据库模式？

# 三、数据库设计问题

- 数据库模式设计不规范会带来一系列的问题
  - 数据冗余
  - 更新异常
  - 插入异常
  - 删除异常

# 示例关系模式R

示例关系模式 R(Tname, Addr, C#, Cname)

一个教师只有一个地址（户口所在地）

一个教师可教多门课程

一门课程只有一个任课教师

因此R的主码是（C＃）

| Tname | Addr | C# | Cname |
|---|---|---|---|
| T1 | A1 | C1 | N1 |
| T1 | A1 | C2 | N2 |
| T1 | A1 | C3 | N3 |
| T2 | A2 | C4 | N4 |
| T2 | A2 | C5 | N5 |
| T3 | A3 | C6 | N6 |

# 1、问题（1）：数据冗余

- 教师T1教了三门课程，他的地址被重复存储了2次

| Tname | Addr | C# | Cname |
|---|---|---|---|
| T1 | A1 | C1 | N1 |
| T1 | A1 | C2 | N2 |
| T1 | A1 | C3 | N3 |
| T2 | A2 | C4 | N4 |
| T2 | A2 | C5 | N5 |
| T3 | A3 | C6 | N6 |

# 2、问题（2）：更新异常

- 如果T1的地址变了，则需要改变3个元组的地址；若有一个未更改，就会出现数据不一致。但DBMS无法获知这种不一致

| Tname | Addr | C# | Cname |
|---|---|---|---|
| T1 | A1 | C1 | N1 |
| T1 | A1 | C2 | N2 |
| T1 | A1 | C3 | N3 |
| T2 | A2 | C4 | N4 |
| T2 | A2 | C5 | N5 |
| T3 | A3 | C6 | N6 |

# 3、问题（3）：插入异常

- 如果要增加一名教师，但他还未带课，则C#和Cname为空，但由于C＃是主码，为空违反了实体完整性，所以这名教师将无法插入到数据库中

| Tname | Addr | C# | Cname |
|---|---|---|---|
| T1 | A1 | C1 | N1 |
| T1 | A1 | C2 | N2 |
| T1 | A1 | C3 | N3 |
| T2 | A2 | C4 | N4 |
| T2 | A2 | C5 | N5 |
| T3 | A3 | C6 | N6 |

# 4、问题（4）：删除异常

- 如果教师T3现在不带课了，则需将T3的元组删去，但同时也把他的姓名和地址信息以及C6课程信息删掉了

| Tname | Addr | C# | Cname |
|---|---|---|---|
| T1 | A1 | C1 | N1 |
| T1 | A1 | C2 | N2 |
| T1 | A1 | C3 | N3 |
| T2 | A2 | C4 | N4 |
| T2 | A2 | C5 | N5 |
| T3 | A3 | C6 | N6 |

# 5、如何解决？

- 方法：模式分解
  - 方法1：R分解为
    - R1(Tname, Addr)
    - R2(C#,Cname)

授课信息丢失了

  - 方法2
    - R1(Tname, Addr, C# )
    - R2( C#, Cname)

R1中问题依然存在

  - 方法3
    - R1( Tname, Addr)
    - R2( Tname ,C#, Cname)

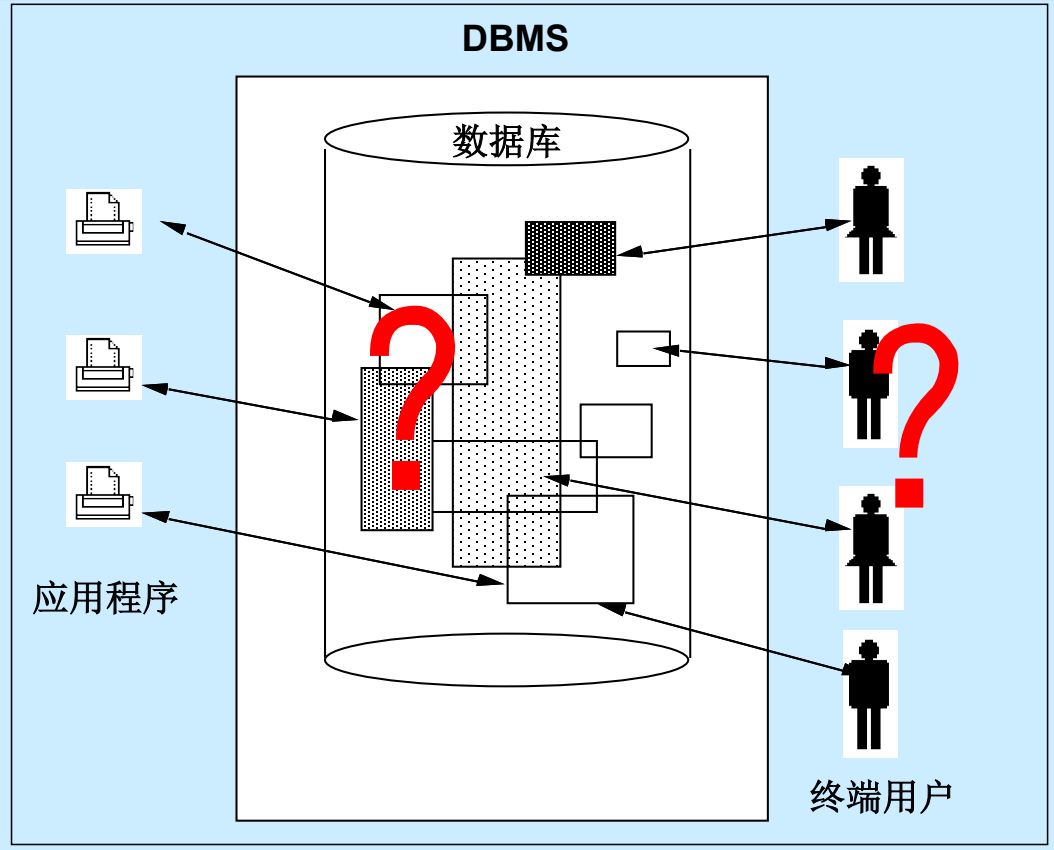
基本解决问题，但又带来join查询代价，可能会导致数据库性能不能满足需求

# 5、如何解决？

- 到底什么样的数据库模式才合理？怎么分解才能满足要求？标准是什么？如何实现？

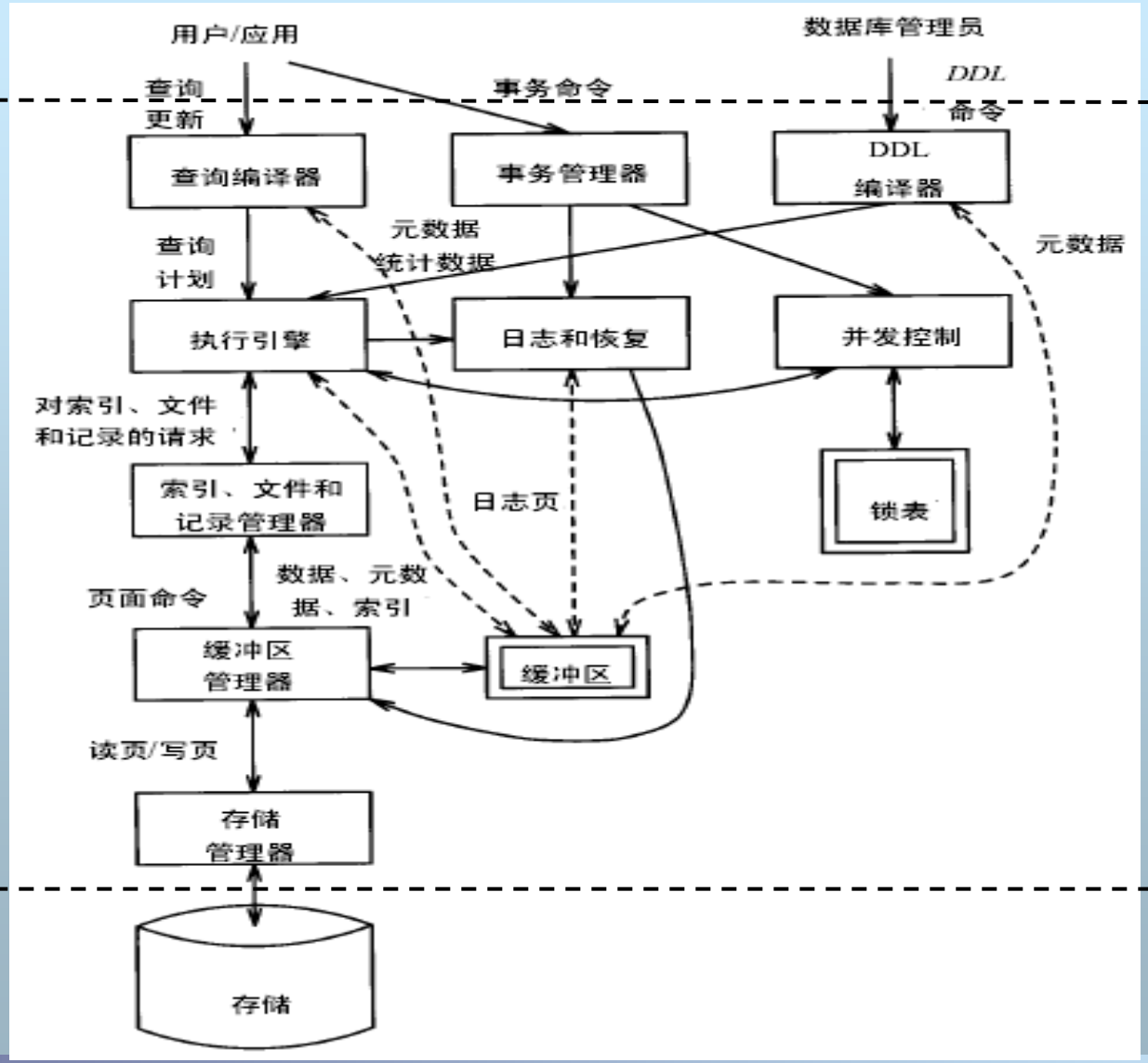
  ——数据库设计要解决的主要问题

# 四、数据库存取问题




- 数据库的存取？
  - 增、删、改、查
- 数据库模式的存取？
- 数据库访问控制信息的存取？

# 四、数据库存取问题


用户/应用
数据库管理员
查询
更新
事务命令
DDL
命令
查询编译器
事务管理器
DDL
编译器
元数据
统计数据
元数据
查询
计划
执行引擎
日志和恢复
并发控制
对索引、文件
和记录的请求
索引、文件和
记录管理器
日志页
锁表
数据、元数
据、索引
页面命令
缓冲区
管理器
缓冲区
读页/写页
存储
管理器
存储
用户
DBMS
数据库

# 四、数据库存取问题

- 用户与数据库的唯一接口——数据库语言
- DBMS支持用户通过数据库语言进行数据存取
- 有三类数据库语言
  - 数据定义语言（Data Definition Language, DDL）
    ——存取数据库模式
  - 数据操纵语言（Data Manipulation Language， DML）
    ——存取数据库数据
  - 数据库控制语言（Data Control Language，DCL）
    ——存取访问控制信息

# SQL的基本组成

SQL
DDL
Create Table/Alter Table/Drop Table：定义基本表
Create View/Drop View：视图操作
Create Index/Drop Index：索引操作
DML
Insert
Delete
Select
Update
数据记录操作
DCL
Grant
Revoke
访问控制

# 本课程的重点

- DBMS实现问题 √
- 数据库设计问题 √
- 数据库存取问题 ×

# 五、数据库技术的发展

- 1961：GE的C.W. Bachman设计了历史上第一个DBMS——网状数据库系统IDS (Integrated DataStore) [1973, 图灵奖]
- 1968：IBM设计了层次数据库系统IMS
- 1969：CODASYL的DBTG发表了网状数据模型报告，奠定了网状数据库技术
- 1970：IBM的E.F. Codd提出了关系数据模型，奠定了关系数据库理论基础 ) [1981, 图灵奖]
- 1974：IBM的Boyce和Chamberlin设计了SQL语言
- 1973～1976：E.F. Codd设计了System R，M. Stonebraker设计了Ingres
- 1976：IBM的Jim Gray提出了一致性、锁粒度等设计，奠定了事务处理基础 ) [1998, 图灵奖]
- 1977：Larry Ellison创建了Oracle公司，1979年发布Oracle 2.0，1986年Oracle上市
- 1983：IBM发布DB2

# 五、数据库技术的发展

- 1985：面向对象数据库技术提出
- 1987：Sybase 1.0发布
- 1990：M. Stonebraker发表“第三代数据库系统宣言”，提出对象关系数据模型 [2014, 图灵奖]
  “For fundamental contributions to the concepts and practices of underlying modern database systems”
- 1987～1994：Sybase和Microsoft合作，发布 Sybase SQL Server 4.2。破裂后Sybase继续发布Sybase ASE 11.0
- 1996：Microsoft发布Microsoft SQL Server 6.5
- 1996：开源的MySQL正式发布
- 1998：提出了半结构化数据模型（XML1.0）
- 2005，M. Stonebraker等开发完成C-Store，Column-based DBMS
- 2007，NoSQL(非关系型数据库)在Web领域大行其道。Amazon (SimpleDB/Dynamo), Google (BigTable/LevelDB), Facebook (RocksDB/Cassandra), MongoDB, HBase, Redis, etc.

# 六、数据库领域的出版物

- 国际会议
  - A类：SIGMOD、VLDB、ICDE （DB三大会议）
  - B类：EDBT、ICDT、CIDR、CIKM、DASFAA
  - C类：DEXA、APWeb-WAIM、ER、SSTD、SSDBM、MDM、WebDB、ADBIS等
  - 中国数据库学术会议NDBC
- 国际期刊
  - A类： VLDB Journal、TKDE 、TODS（DB三大期刊）
  - B类：DKE、Information Systems、GeoInformatica等

可参考CCF计算机国际会议与期刊排名

# 本章小结

- 数据库系统的基本概念
- DBMS实现问题
- 数据库设计问题
- 数据库存取问题
- 数据库技术的发展