# CS213 数据库原理 Project 2 报告

2024 年 1 月 4 日

**肖翊成**
xiaoyc2022@mail.sustech.edu.cn
12210414

## 1 数据库设计

数据库设计过程中需要考虑**实体（Entities）** 和 **关系（Relations）**. 数据库设计的目标是为了减少数据库调用过程中的冗余。

### 1.1 ER 图设计

我使用了 Chow's foot 的方法去绘制 ER 图，这种 ER 图的好处是在设计过程中就可以明确每个属性在数据库中的类型，并且清晰的表现出关系的多对多，一对多等关系，便于后续表的创建。

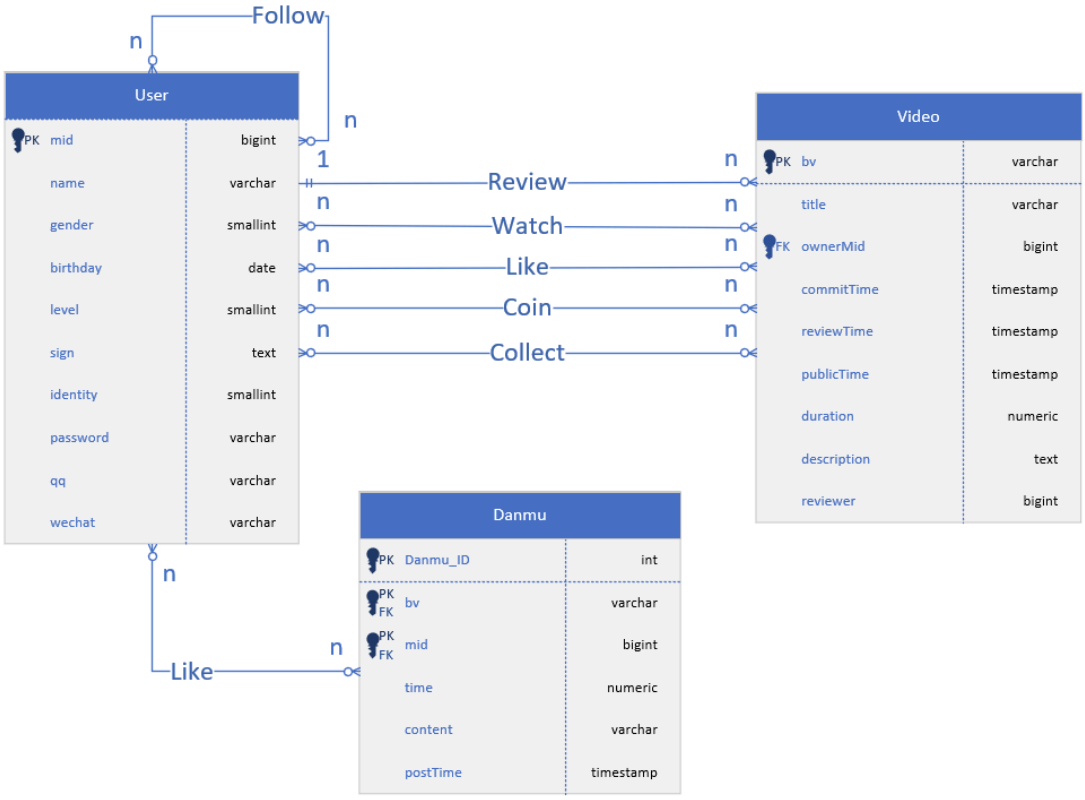



图 1　ER graph

### 1.2 Datagrip 可视化

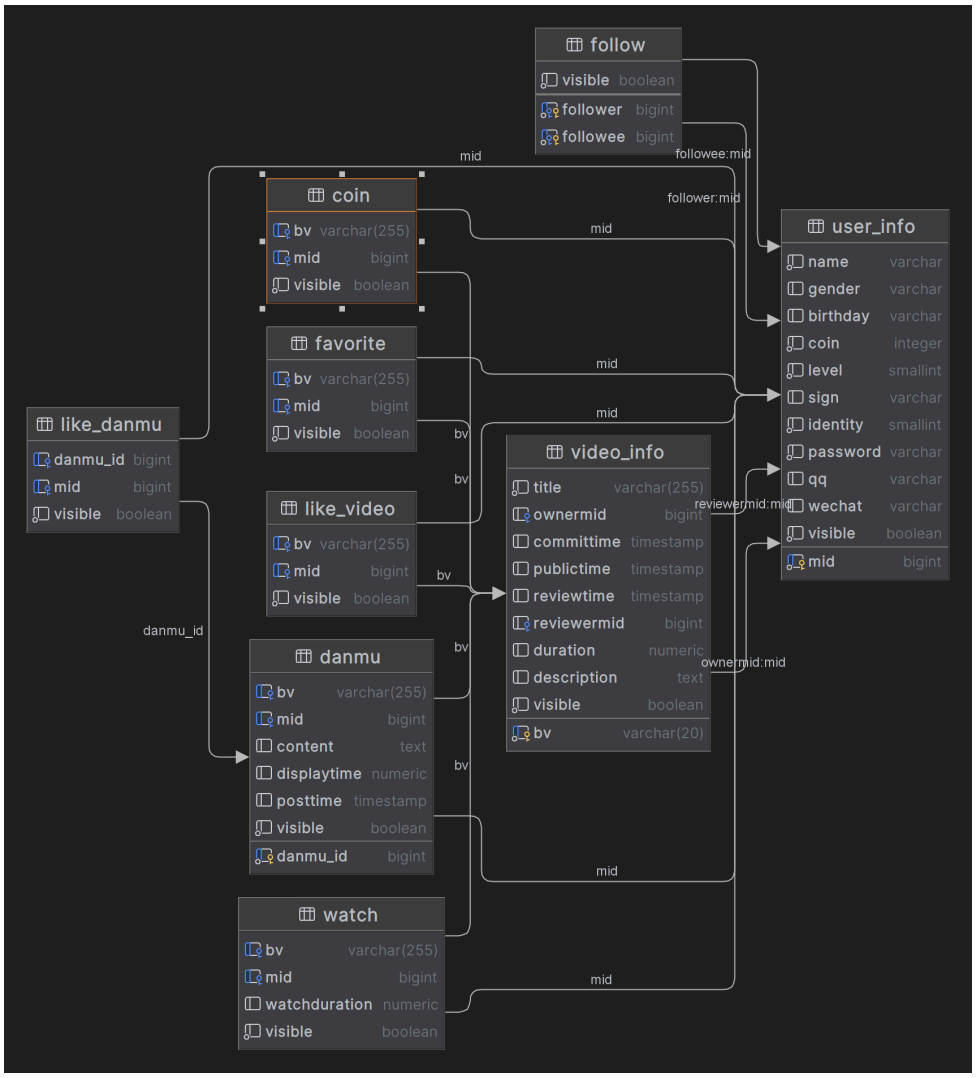



图 2　Data Grip 可视化表图

## 1.3 设计细节

基于上述目标和陈述，我的数据库分为以下几张表: user_info, video_info, danmu, watch, like_video, coin, favorite, like_danmu, follow. 对于 ER 图中多对多的关系，我都对其建立了单独的表， 表的设计过程中严格遵守了范式原理。

### 1.3.1 第一范式

第一范式要求**最小化数据单元**，不允许在一条记录的一条属性中出现大于一条的内容。在 Java 的 UserRecords, VideoRecords 和 DanmuRecords 类中, following, like, coin, favorite, viewerMids, viewTime 和 likedBy 都是以数组的方式进行存储， 我对所有这些数据都新建了关系表来进行存储：follow, like_video, coin, favorite, watch 和 likedBy.

### 1.3.2 第二范式

第二范式要求键值必须独立，**不能出现键值之间有相互依赖的关系**。在 user_info, video_info 和 danmu 三张表中，每一条记录都是依赖与一个独立的键值 (MID, BV, Danmu_id)。对于其余的 6 张表，键值由 MID 和 BV （在 like_danmu 中还包括 danmu_id) 等外键构成，用于表示这是一个与 video_info 和 user_info 相关的关系表. 由于 BV 和 MID（还有 danmu_id）都是互相独立的，因此键值之间也不存在依赖关系。

### 1.3.3 第三范式

第三方是要求**非键值之间不能存在相互依赖的关系**。在 user_info 中，属性 name, gender, birthday, coin, level, sign, identity, password, qq, wechat 互不依赖，只依赖于键值 MID. 在 video_info 中，属性 title, ownerMID, commitTime, publicTime, reviewTime, reviewerMID, duration 互不依赖，只依赖于键值 BV. 在 danmu 中，BV 和 MID 依赖于 danmu_id 因为每一条弹幕只能由一个人在一个视频中发送。其他属性 content, displayTime, postTime 都只依赖于 danmu_id 且互不依赖。

## 1.4 用户创建和权限管理

我的用户创建和权限管理如下：

```
CREATE ROLE sustc LOGIN PASSWORD '000000';
GRANT CONNECT ON DATABASE sustc TO sustc;
GRANT SELECT, UPDATE, INSERT on ALL TABLES IN SCHEMA public to sustc;
GRANT EXECUTE ON ALL FUNCTIONS IN SCHEMA public TO sustc;
ALTER TABLE * OWNER TO sustc;
```

这遵循了最小权限原理，连接只允许 Java 程序连接 sustc 用户并且只有对数据进行 SELECT, UPDATE 和 INSERT 的权限。但是在 Benchmark 测试中，我给予了 sustc 用户更多的权限因为性能需要。

- DELETE: 在 deleteVideo 和 deleteAccount 过程中，级联删除往往能带来比 Visible 更高的效率。
- CREATE/DROP: 在数据导入的过程中，我们可以通过先关闭外键和索引来提高插入速率，由于提供的数据都是合法的（仅限在本次 Project 中是这样），可以在插入过程完成后再添加外键和索引，这样能提高运行的效率。如图所示：
  - 在导入数据完成后添加外键和索引：

| Test Step | # Case | # Passed | Std. Time (ms) | Elapsed Time (ms) | Correctness | Performance |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | N/A | N/A | 65832 | 46960 | N/A | 1.00 |

  - 不删除外键和索引:

| Test Step | # Case | # Passed | Std. Time (ms) | Elapsed Time (ms) | Correctness | Performance |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | N/A | N/A | 65832 | 77195 | N/A | 0.85 |

如果不适用 DELETE，视图和 visible 列可以用于保证数据的完整性，并防止数据被恶意删除。我们可以通过 UPDATE ON <table_name> SET visible = false WHERE <condition> 来设置数据的可见度。并让用户通过访问视图来访问数据。

```
Execute | JSON | Copy
CREATE OR REPLACE VIEW user_info_view AS
    SELECT * FROM user_info WHERE visible = true;

Execute | JSON | Copy
CREATE OR REPLACE VIEW video_info_view AS
    SELECT * FROM video_info WHERE visible = true;

Execute | JSON | Copy
CREATE OR REPLACE VIEW danmu_view AS
    SELECT * FROM danmu WHERE visible = true;
```

图 3　视图创建案例（不完整）

# 2 API 基础实现

下图是在 Benchmark OJ 中 API 的性能结果。

| Test Step | # Case | # Passed | Std. Time (ms) | Elapsed Time (ms) | Correctness | Performance |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | N/A | N/A | 65832 | 46960 | N/A | 1.00 |
| 2 | 20 | 20 | 376 | 483 | 1.00 | 0.78 |
| 3 | 61 | 61 | 34 | 73 | 1.00 | 0.47 |
| 4 | 56 | 56 | 9 | 7 | 1.00 | 1.00 |
| 5 | 43 | 43 | 1729 | 1719 | 1.00 | 1.00 |
| 6 | 11 | 11 | 925 | 574 | 1.00 | 1.00 |
| 7 | 27 | 27 | 3311 | 1081 | 1.00 | 1.00 |
| 8 | 142 | 142 | 29219 | 6225 | 1.00 | 1.00 |
| 9 | 382 | 382 | 14 | 22 | 1.00 | 0.64 |
| 10 | 1016 | 1016 | 40 | 62 | 1.00 | 0.65 |
| 11 | 500 | 500 | 134 | 306 | 1.00 | 0.44 |
| 12 | 500 | 500 | N/A | N/A | 1.00 | N/A |
| 13 | 511 | 511 | 148 | 152 | 1.00 | 0.97 |
| 14 | 686 | 686 | 189 | 211 | 1.00 | 0.90 |
| 15 | 644 | 644 | 156 | 185 | 1.00 | 0.84 |
| 16 | 184 | 184 | 42 | 18 | 1.00 | 1.00 |
| 17 | 273 | 273 | 46 | 808 | 1.00 | 0.06 |
| 18 | 184 | 184 | 25 | 14 | 1.00 | 1.00 |
| 19 | 35 | 35 | 11 | 13 | 1.00 | 0.85 |
| 20 | 6 | 6 | 29 | 270 | 1.00 | 0.11 |
| 21 | 55 | 55 | 362 | 449 | 1.00 | 0.81 |
| 22 | 199 | 199 | 114 | 127 | 1.00 | 0.90 |
| 23 | 87 | 87 | 18 | 20 | 1.00 | 0.90 |

正确率的平均值为 1.00，速率的平均值为 0.79. 可以在 这里查看这次结果。

# 3 进阶 API 实现

## 3.1 更快速

### 3.1.1 Batch 批处理

在 Java 中，通过 `addBatch()`和 `executeBatch()`可以对数据进行批处理，提高运行的效率。但是我在测试的过程当中发现，如果 `batch`过大，可能会导致栈内资源不足，以及在最后 `executeBatch()`的过程中效率也会非常低，因此需要手动设置 `count`，在到达一定的 `count` 之后就执行一次 `executeBatch()`,这样可以进一步提高数据导入的效率，示例如下：

```java
int count = 0;
try(PreparedStatement follow_stmt = conn_1.prepareStatement(sql_follow)){
    for (int i = 0; i < userRecords.size() / 4; i++) {
        for (int j = 0; j < userRecords.get(i).getFollowing().length; j++) {
            follow_stmt.setLong(parameterIndex:1, userRecords.get(i).getMid());
            follow_stmt.setLong(parameterIndex:2, userRecords.get(i).getFollowing()[j]);
            follow_stmt.addBatch();
            count++;
            if(count % batch == 0){
                follow_stmt.executeBatch();
                conn_1.commit();
            }
        }
    }
    follow_stmt.executeBatch();
    conn_1.commit();
    follow_stmt.close();
    System.out.println(x:"[Thread 1] Follow inserted");
```

图 4　批处理案例（不完整）

| **Batch 参数大小** | 5000 | 10000 | 5000 | 50000 | 100000 | 1000000 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **运行时间(ms)** | 60799 | 56091 | 66366 | 67725 | 70960 | 76387 |

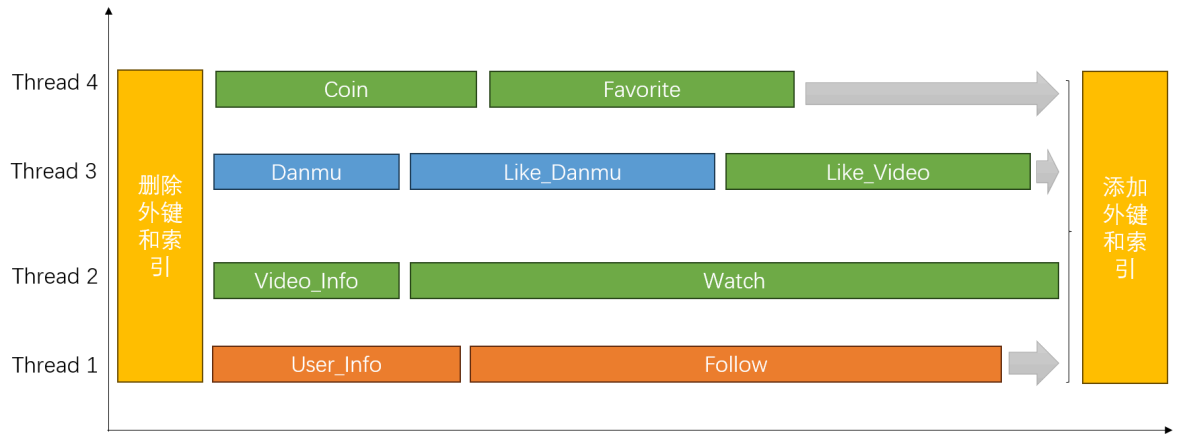
表 1　本地运行运行时间测试

不难看出将 Batch 的大小设置太大和太小均会导致批处理的性能变弱，因此选择合适的批处理大小非常重要，以下测试均是在 Batch 大小为 50000 的情况下进行运行。

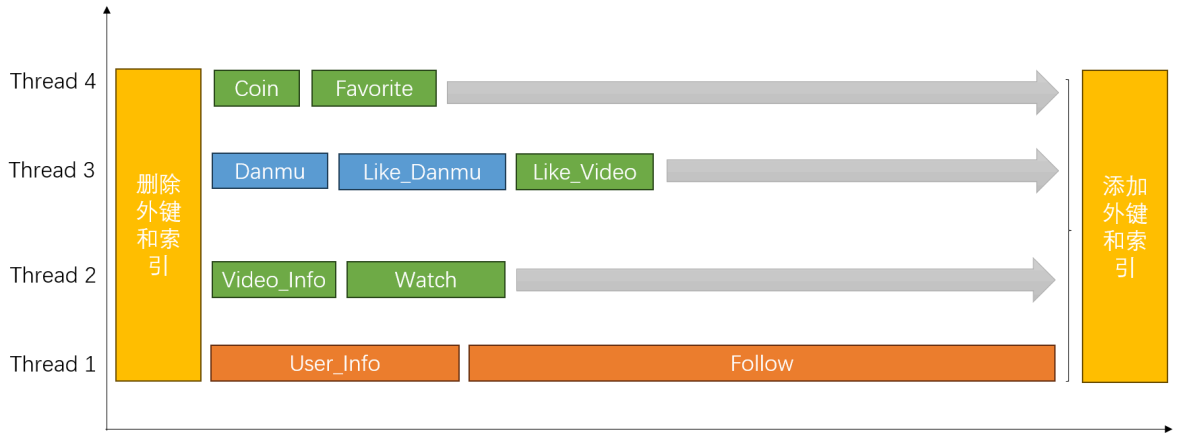
### 3.1.2 Thread 多线程

在数据导入过程中，顺序插入数据花费了大量时间，因为最大的表包含将近 600 万条记录（小数据集）和大约 800 万条记录（大数据集）。在我的第一个实现版本中（很抱歉，我忘记保存记录了，因此没有可运行的例子可以展示），插入大数据集的所有数据大约需要 4 分钟，插入小数据集的时间大约是 1 分半钟。在用 4 个线程实现导入过程之后，大数据集的耗时可以降低到 1 分钟（没有索引），小数据集的耗时降低到 50 秒（在插入后建立索引）。我的实现方式也随着时间变化：

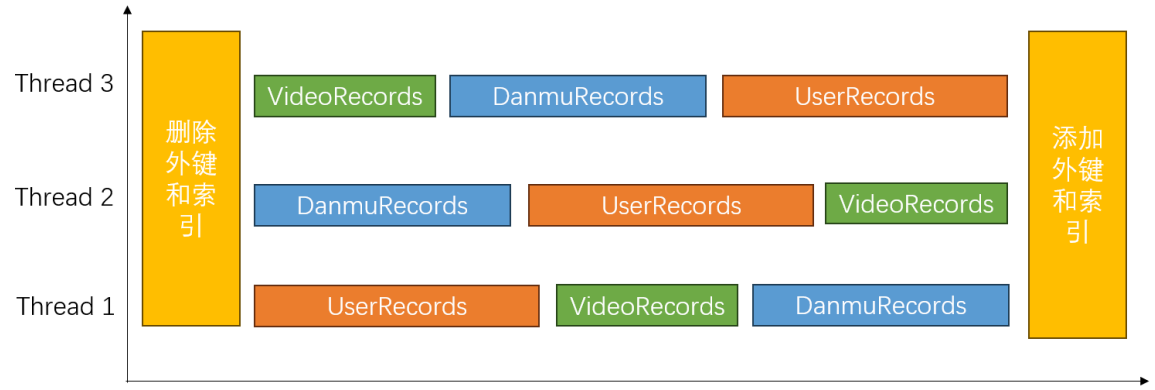
- 在最初多线程的设计中，我是基于数据大小进行设计的。我提前预估了每张表的大小，按照大小将不同表的插入任务分配到了不同的线程，基于大数据集我的设计如下：




但是显然这样的表存在很大的问题，其中一个就是复用性问题，在小数据集中，只有 `follow` 表仍然保持比较大的数据量，这就会让导入数据的过程变得不平衡。如下图所示：




- 第二次插入过程中，我将 `follow` 表的插入过程分别插入到了四个线程之中，需要注意的是，Postgresql 有在插入过程中的 `lock` 机制，如果在同一时间对数据进行插入（执行 Batch 指令）会导致数据丢失。因此最后为了防止数据冲突，我将 `userRecords` ,`videoRecords` 和 `danmuRecords` 均平分到三个线程，通过调控不同线程的插入顺序来避免数据冲突，提高了插入过程的复用性。




在 Benchmark OJ 上，最高的插入效率可以提高到平均时间 50s 左右。（如果除去索引和外键的建立时间大约平均时间 30s 左右）

### 3.1.3 索引建立

索引的建立对于性能的提升是非常显著的，简单来说，索引的建立是用空间来换取时间的一种平衡手段。创建索引会占据大量空间。

| | user info | video info | danmu | coin | like video | follow | like danmu | favorite | watch |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **table size** | 6336 kB | 64 kB | 72 kB | 26 MB | 28 MB | 297 MB | 600 kB | 25 MB | 50 MB |
| **index size** | 3728 kB | 48 kB | 96 kB | 21 MB | 23 MB | 464 MB | 616 kB | 20 MB | 40 MB |
| **total size** | 10064 kB | 112 kB | 168 kB | 47 MB | 50 MB | 760 MB | 1216 kB | 45 MB | 91 MB |

表 2　数据库表和索引大小统计

对于每一张表，根据主要查询索引的不同，我建立了多个索引：

```
CREATE index user_index ON user_info (MID);
CREATE index user_index_qq ON user_info (QQ);
CREATE index user_index_wechat ON user_info (Wechat);
CREATE index follow_index ON follow (follower, followee);
CREATE index follow_index_followee ON follow (followee);
CREATE index video_index ON video_info (BV);
CREATE index video_index_owner ON video_info (ownerMID);
CREATE index danmu_index ON danmu (Danmu_ID, BV, MID);
CREATE index danmu_index_bv ON danmu (BV, MID);
CREATE index danmu_index_MID ON danmu (MID);
CREATE index watch_index ON watch (BV, MID);
CREATE index watch_index_mid ON watch (MID);
CREATE index like_video_index ON like_video (BV, MID);
CREATE index like_video_index_mid ON like_video (MID);
CREATE index coin_index ON coin (BV, MID);
CREATE index coin_index_mid ON coin (MID);
CREATE index favorite_index ON favorite (BV, MID);
CREATE index favorite_index_mid ON favorite (MID);
CREATE index like_danmu_index ON like_danmu (Danmu_id, MID);
CREATE index like_danmu_index_mid ON like_danmu (MID);
```

以最大表 follow 为例，我们可以看到建立索引对于信息的查询的速率优化效果。我们测试

```
EXPLAIN ANALYSE SELECT followee FROM follow WHERE follower = <mid_input>
INTERSECT
SELECT follower FROM follow WHERE followee = <mid_input>;
```

运行时间从原来的 200ms 左右快速下降到只需要 1ms 左右的查询时间。



以下陈列了一些在加入索引之后效率提升较大的 API。

| Benchmark ID | Benchmark Content | Performan Without Index | Performance With Index (avg) | Performance With Index (Best) |
|---|---|---|---|---|
| 10 | sendDanmu | 0 | 0.47 | 0.65 |
| 11 | getUserInfo | 0 | 0.33 | 0.44 |
| 13 | coinVideo | 0.13 | 0.74 | 0.97 |
| 14 | likeVideo | 0.12 | 0.67 | 0.9 |
| 15 | collectVideo | 0.1 | 0.74 | 0.84 |
| 18 | updateVideoInfo | 0.28 | 1 | 1 |
| 19 | reviewVideo | 0.42 | 0.73 | 0.85 |
| 22 | deleteAccount | 0 | 0.81 | 0.9 |
| 23 | follow | 0.08 | 0.67 | 0.9 |
| **Average** | | 0.415 | 0.675909091 | 0.787272727 |

表 3　Performance Comparison Table

### 3.1.4 视图创建

在使用 API 的过程中，对常用表格建立视图可以提高同时大量查询的效率，因为不需要对表格进行反复 `join` 和筛选的操作。我根据 API 调用时的需要创建了以下视图：

```
--用于展示已经经过审核的并且发布过的视频，在很多 API 中比如 generalRecommendation()等均有调用到
CREATE OR REPLACE VIEW public_video AS
    SELECT video_info.bv AS bv
    FROM video_info
    where reviewtime IS NOT NULL
    AND publictime < NOW()
    AND reviewtime < NOW();
--用于展示每一个视频的播放量，在计算一个视频的 Popularity 得分时需要反复调用到每个视频的播放量，而在数据库中 watch 不是以每个视频的总数存储，而是陈列了观看的具体数据
CREATE OR REPLACE VIEW count_watch AS
    SELECT watch.bv AS bv, count(watch.bv) AS watch_count
    FROM watch
    GROUP BY watch.bv;
--用于计算完播率，在 Recommendation 中常用到
CREATE OR REPLACE VIEW watch_rate AS
SELECT video_info.bv AS bv, avg(watch.watchduration/video_info.duration) AS watch_rate
    FROM video_info, watch
    WHERE video_info.bv = watch.bv
    GROUP BY video_info.bv;
```

视图的创建提高了像 Recommendation 中的推荐指数计算的效率，能够有更好的性能呈现。

## 3.2 易维护

### 3.2.1 在数据库中实现方法

对比在 Java 中单独写出 SQL 指令，我通过 SQL 文件在数据库中实现方法，这样在 JAVA 中只需要输入指令 `SELECT function_name(input variable(s))`。在对 API 进行维护的时候非常方便，因为不需要对后端 Java 程序进行频繁的修改，而仅需要修改数据库中的函数内容即可。通过 `CREATE OR REPLACE FUNCTION function_name(input variable(s))`可以对函数进行快速修改和调整。同时数据库会对反复调用的函数进行优化，以提高查询的效率。

### 3.2.2 将常用方法单独建立

通过将常用方法单独写出，可以有更好的复用性。比如对于用户 `AuthInfo` 的认证，对于视频 `BV` 的验证，以及 `MID` 和 `BV` 的生成函数，我均单独列出，这样当我需要对其中的部分进行的调整，可以单独调整常用的方法。我此次创建的常用函数有：

```
--Function 1: To authenticate whether a user is valid and return the mid
CREATE OR REPLACE FUNCTION is_auth_valid(mid BIGINT, password VARCHAR, qq VARCHAR,
wechat VARCHAR) RETURNS BIGINT;
--Function 2: To authenticate whether a bv is available in public and return the bv.
CREATE OR REPLACE FUNCTION is_bv_valid_for_users (search_bv VARCHAR) RETURNS VARCHAR;
CREATE OR REPLACE FUNCTION is_bv_valid_for_superusers (search_bv VARCHAR) RETURNS
VARCHAR;
--Function 3: To determine whether a insertion time for danmu is valid for a video.
CREATE OR REPLACE FUNCTION time_valid(bv varchar, timeStart numeric, timeEnd numeric)
RETURNS INTEGER;
--Function 4: Is SuperUser
```

```
CREATE OR REPLACE FUNCTION is_super_user(mid BIGINT) RETURNS BOOLEAN;
--Function 5: Is video VALID
CREATE OR REPLACE FUNCTION is_video_valid(mid BIGINT, title VARCHAR) RETURNS BOOLEAN;
--Function 6: Do user exist?
CREATE OR REPLACE FUNCTION is_user_exist(mid BIGINT) RETURNS BOOLEAN;
--FUnction 7: is register info valid?
CREATE OR REPLACE FUNCTION is_reg_valid(name varchar, qq varchar, wechat varchar)
RETURNS INTEGER;
--Function 8: Generate the MID
CREATE OR REPLACE FUNCTION generate_mid () RETURNS BIGINT;
--Function 9: Generate BV function:
CREATE OR REPLACE FUNCTION generate_bv () RETURNS VARCHAR;
```

## 3.3 更安全

### 3.3.1 用户权限设置

更详细的内容可以参考 小节 1.4 中的内容，用户权限设置可以防止数据被恶意删除，以及防止用户对数据库的物理存储设置进行修改。

### 3.3.2 对密码进行加密

本文使用了拓展包 `pgcrypto` 对数据的密码进行了加密处理，防止用户的密码被窃取，增强了数据的安全性。通过 `SHA256` 的哈希算法对数据密码进行加密映射。本加密方式的嵌入也体现了在小节 3.2.2 中提及的易维护性，对于数据的加密和验证只需要添加下面代码以及在 `is_auth_valid` 方法中对密码数据进行一次映射即可。

```
CREATE EXTENSION IF NOT EXISTS pgcrypto;

CREATE OR REPLACE FUNCTION encrypt_password()
RETURNS TRIGGER AS $$
BEGIN
    -- Encrypt the password using SHA256
    NEW.password := encode(digest(NEW.password, 'sha256'), 'hex');
    RETURN NEW;
END;
$$ LANGUAGE plpgsql;

CREATE TRIGGER before_user_insert
    BEFORE INSERT ON user_info
    FOR EACH ROW
    EXECUTE FUNCTION encrypt_password();
```

### 3.3.3 审计

审计是在设置 `visible` 表之外保证数据安全的另外一个方式，可以通过以下方式建立审计表格：

```
CREATE TABLE audit_log (
    audit_log_id SERIAL PRIMARY KEY,
    timestamp TIMESTAMP DEFAULT CURRENT_TIMESTAMP,
    username VARCHAR(255),
    action_type VARCHAR(50), -- e.g.UPDATE, DELETE
    table_name VARCHAR(255),
    query_text TEXT,
    client_ip VARCHAR(50),
```

```
    user_agent VARCHAR(255)
);

CREATE OR REPLACE FUNCTION audit_trigger_function()
RETURNS TRIGGER AS $$
BEGIN
    INSERT INTO audit_log (username, action_type, table_name, query_text, client_ip,
user_agent)
    VALUES (
        current_user,
        TG_OP,
        TG_TABLE_NAME,
        current_query(),
        inet_client_addr(),
        inet_client_port()
    );
    RETURN NEW;
END;
$$ LANGUAGE plpgsql;

CREATE TRIGGER audit_trigger_user_info
AFTER INSERT OR SELECT OR UPDATE OR DELETE ON user_info
FOR EACH ROW EXECUTE FUNCTION audit_trigger_function();
```

通过这样的方式，可以记录用户对数据库的更新，删除操作。但是由于加入审计表后数据性能会差距较大，并且由于使用了 `PreparedStatement` 后，`current_query()`函数没有办法获取到每次操作的具体数据（会有对应的 query 信息但是关键信息由? 代替），审计表的方式并没有最后采用，只是在此陈列出可以通过该方式增强数据库的安全性。

# 4 总结

在本次项目中我接触了 SpringBoot, Gradle, Hikari Pool 等等以前从来没用到过的框架、工具，实现了以前觉得很遥远的各种 API 接口，也算是很有成就感，收获颇丰。

有点遗憾的就是感觉对数据库底层原理仍然不甚了解（可能只是知道用了什么 B+树啊什么的），只能说现在大概了解了数据库使用层面的各种设置有些什么。（数据库还是真的是神奇的东西，怎么做到优化这么好的...）

但此次项目耗时时间比较长，很多时候是因为对于 API 的需求阅读不仔细，所以花了很多时间在正确率的提高上面，最后留给优化的时间非常有限，也有很多东西没有来得及探索：比如有没有可能对 Query 进行进一步优化，有没有可能使用 GPU 加速，线程池的工作原理，如何能建立一种更加稳定的并行插入方式，而不会导致数据被吞（尝试使用 parallel stream 来插入数据，但是结果就是 90% 以上的战损率于是作罢了），还有不同数据结构的 index 在不同表的性能表现有何不同，只能说最后把能想到的优化都尝试了一下。[1]

[1]完结撒花❀！感谢于老师王老师和助教们这一个学期以来的付出！