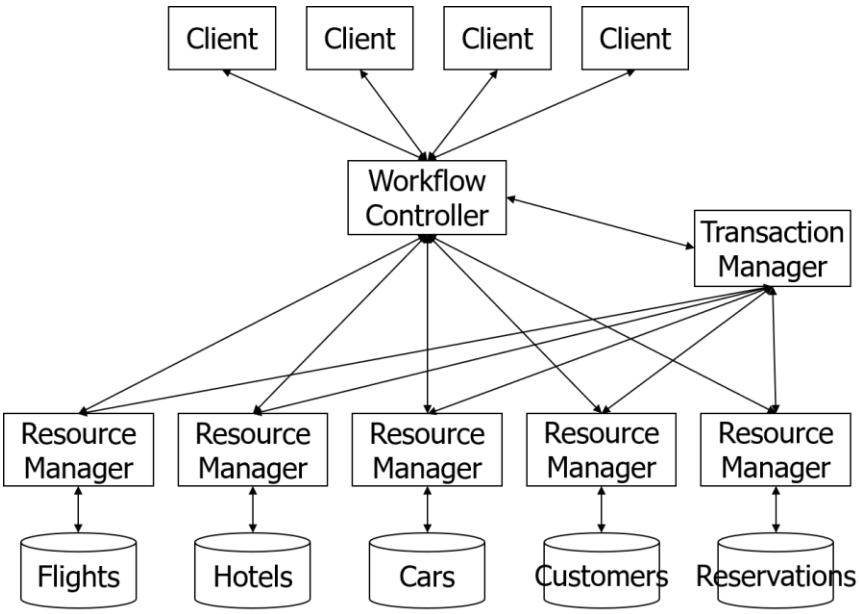
《分布式旅游预订系统》技术报告

谢思豪 19212010037

一．概述

本系统主要分为三个模块：资源管理器（Resource Manger，RM），事务管理器（Transaction Manager，TM）和流程控制器（Workflow Controller，WC）。其中，资源管理器负责实际数据的增删改查与持久化；事务管理器负责管理事务，保证事务的 AICD 特性，即使系统出现故障，事务的 ACID 特性仍会得到保证；流程控制器用于整合资源管理器与事务管理器的功能，对外提供业务接口，是用户与系统交互的唯一入口。系统各模块间交互逻辑如下图所示：



27

二．资源管理器（RM）

RM 负责实际数据的增删改查与持久化，并对外提供操作数据的接口（如 query，insert，delete 等）以及与事务相关的接口（如 prepare，commit 等）。在 RM 中，数据以 ResourceItem 的形式存储在 HashTable 之中。课程提供的 Source Code 中已经实现了 RM 的绝大部分功能，本项目主要进行了四点改动：

1. 创建与实际数据表对应的实体类

本质上，每个数据表中存储的数据都为 ResourceItem，但不同的实体拥有不同的属性，所以需要为每个实体创建对应的继承自 ResourceItem 的实体类。根据项目说明，本系统共包含五个实体类：Flight，Hotel，Car，Customer，Reservation。每个实体类均继承自 ResourceItem 并拥有自己独特的属性与主键。考虑到 Customer 和 Reservation 的主键不同，为了便于后续操作，本系统将他们独立开来。

2. 将 RMManager***.java 代码归入 ResourceManagerImpl.java 之中

不同的 RM 管理着不同的数据表。虽然不同的数据表中存放的实体不同，但是通过合理的抽象与封装，不同的 RM 操作其管理的数据表的逻辑完全一致。因而，在本系统中，不同的 RM 的唯一区别在于其名字不同。所以，我们认为没必要为每个 RM 新建一个单独的类，而是将实例化不同 RM 的逻辑统一归入

ResourceManagerImpl.java 之中，并通过传入不同的 rmiName 属性来区分不同的 RM 实例。通过这种方式，减少了冗余代码，降低了系统的复杂度，更利于管理。

3. **保证各 RM 之间的隔离性**

   不同的 RM 复用了同一份代码（即 ResourceManagerImpl.java），因而，我们应保证 RM 之间的隔离性。但是我们在测试的过程中发现，ResourceManagerImpl.java 中对于事务日志的保存逻辑并没有保证各 RM 之间的隔离性，都统一写入了文件 transactions.log 之中。这导致的最直接问题是各 RM 之间的事务日志相互干扰。为了解决这一问题，我们在每个 RM 的事务日志文件名中加入了 RM 的名字以区别不同的 RM 事务日志。例如，对于 RMFlights 来说，其事务日志存储于文件 RMFlights_transactions.log 之中。

4. **保证事务状态发生改变后立即写入事务日志中**

   RM 事务日志用于保存 RM 当前的事务状态并用于系统故障后的恢复。因此，每当事务的状态发生改变时（如新建事务，事务提交等），应立即把该变化写入事务日志之中。但我们测试时发现，ResourceManagerImpl.java 中 commit 方法和 abort 方法的实现并未做到这一点。更准确的说，当 RM commit 或 abort 成功后，并未将这一信息立即写入日志之中。为了解决这一问题，我们在 ResourceManagerImpl.java 的 commit 方法和 abort 方法中分别加入了写入 RM 事务日志的代码逻辑。具体改动如下所示：

```
@@ -609,6 +626,7 @@ public void commit(int xid) throws InvalidTransactionException, RemoteException
609 626
610 627             synchronized (xids) {
611 628                 xids.remove(new Integer(xid));
    629 +               storeTransactionLogs(xids);
612 630             }
613 631         }
614 632
@@ -635,40 +653,7 @@ public void abort(int xid) throws InvalidTransactionException, RemoteException {
635 653
636 654             synchronized (xids) {
637 655                 xids.remove(new Integer(xid));
    656 +               storeTransactionLogs(xids);
638 657             }
639 658         }
```

三．事务管理器（TM）

TM 负责保证事务的 ACID 特性。所有事务开始之前都需要先从 TM 中拿到事务 ID（xid）后才能进行后续的操作。同时，TM 中还利用 Map 维护了每个事务所涉及的所有 RM，原子性的保证就是通过保证一个事务涉及的所有 RM 最终都执行了相同的事务操作（commit 或 abort）来实现的。

TM 的一个很重要的功能是保证当系统出现故障后事务的 ACID 仍能被保证。为了做到这一点，TM 在一个事务的状态发生变化时，都会立即将这一变化写入磁盘中。例如，当有 RM 通过 enlist 接口通知 TM 它所参与的事务 id 时，TM 会记录这一信息并写入磁盘之中。再比如，当用户希望提交事务并且事务可以提交时，TM 会将相应的事务状态改为 committed 并写入磁盘后再返回提交成功的信息。TM 通过这种先记入日志再返回结果的方式，保证了所有 TM 承诺的操作最终都会被完成（即使系统出现故障）。

本系统共考虑了八种异常情况

1. **RM 在 enlist 后 fail（AfterEnlist）**
   由于 RM 在 enlist 后就 fail 了，所以用户无法完成后续的对数据的操作，因而 abort 整个事务。
2. **RM 在 prepare 前 fail（BeforePrepare）**
   由于 RM 的 prepare 未成功，所以 TM 应返回 commit 失败的信息，并 abort 整个事务。
3. **RM 在 prepare 后 fail（AfterPrepare）**
   虽然在这种情形下，RM 已经 prepared 了，但由于代码中的实现方式使得 RM 无法通知 TM 其已经“prepare OK”了，所以对于 TM 来说，RM 的 prepare 操作是失败的，所以我们选择给用户返回 commit 失败的信息并 abort 整个事务。
4. **RM 在 commit 前 fail（BeforeCommit）**
   RM 的 commit 函数被调用，说明整个事务已经进入了 commit 状态，所以这个事务涉及的所有 RM 都必须成功的执行 commit 操作。若 RM 在 commit 前 fail，那 TM 则不会将此 RM 从其对应的事务的 RM 列表中移除，而是在 RM 重启后再次调用它的 commit 函数，直到成功为止。
5. **RM 在 abort 前 fail（BeforeAbort）**
   与第 4 点类似，RM 的 abort 函数被调用说明整个事务已经进入了 abort 状态，则该事务涉及的所有 RM 都应该成功执行 abort 操作。若 RM 在 abort 前 fail 了，则 TM 会在 RM 重启后再次调用 abort 函数，直到成功为止。
6. **TM 在 commit 前 fail（BeforeCommit）**
   根据定义，TM 在收到所有 RM 的“prepare OK”消息后，并在将日志中的事务状态改为 committed 之前失败。在这种情况下，客户端感知到 TM 失败并告诉用户事务未成功提交。而对于 TM 来说，由于其未能将日志中事务的状态改成 committed，所以在其重启后会选择 abort 这个事务。这个操作是和用户得到的反馈一致的。
7. **TM 在 commit 后 fail（AfterCommit）**
   与第 6 点类似，但此种情况下 TM 已将磁盘中事务的状态改为了 committed，所以，事务最终将会被 commit。在 TM 重启后，它会调用此事务涉及的所有 RM 的 commit 接口，并保证所有的 RM 最终都成功 commit。
8. **整个系统 fail**
   若整个系统 fail，当 TM 重启时，它能从日志中获取系统 fail 前的所有事务状态，对于已经进入 committed/aborted 状态的事务来说，TM 会等到涉及的 RM 重启成功后调用 RM 对应的 commit/abort 接口。而对于系统 fail 前还处于执行中的事务，TM 会将它们的状态改为 aborted，并调用所有涉及到的 RM 的 abort 接口将事务 abort。通过这种方式，可以保证所有事务的 ACID。

四．流程控制器（WC）

WC 的主要作用在于对外提供业务接口，是用户和系统交互的唯一入口，也是用户所能感受到的唯一组件。WC 的实现并不复杂，所有业务接口的实现逻辑都类似：即通过调用 RM/TM 提供的基础接口以完成对应的业务逻辑。每个业务接口的行为在 WorkflowController.java 文件中都有详细定义，根据定义编写代码即可，这里就不再赘述。

而对于系统测试类接口，我们主要做了两个重构：一是将 dieRM***(String who)接口统一成了 dieRM(String who, String dieTime)接口；二是将 dieTM***()接口统一成了

dieTM(String dieTIme)接口。考虑合并这些接口的原因是因为这些接口的唯一不同在于dieTime，而 dieTime 完全可以使用参数的形式传入，没必要在接口名中硬编码 dieTime。通过这种合并，可以减少很多不必要的重复代码，使得代码更加清晰，更容易维护。

五．测试用例的编写

为了使得测试用例逻辑清晰且易于维护，本项目在 src 目录下新建了 test 文件夹用来专门存放测试用例，并提供了编译运行测试用例所需的 Makefile。本项目的测试用例基于 Junit 框架编写，共分为四个部分，分别为：

1. **NormalTest.java**
   在该文件中，我们假设系统没有发生故障，针对 WC 提供的所有业务接口进行了功能测试，保证所有的接口行为都是正确的。
2. **RMFailureTest.java**
   在该文件中，针对 RM 的五种不同 fail 时间进行了测试，以保证在所有情况下事务的 ACID 都能得到保证。
3. **TMFailureTest.java**
   在该文件中，针对 TM 的两种不同 fail 时间进行了测试，以保证在所有情况下事务的 ACID 都能得到保证。
4. **SystemFailureTest.java**
   在该文件中，我们针对整个系统都发生故障的情形进行了测试，以保证在系统故障的情况下事务的 ACID 依然能得到保证。

关于测试用例的详细说明请参见《分布式旅游预订系统》测试用例及说明。

六．总结

就我个人而言，我觉得这是一个很好的课程实践项目。做完这个课程实践项目，我最大的收获是对分布式事务有了更深刻的认识。通过实现一个具体的系统，使我对事务的 ACID 特性的理解不止停留于理论层面，而是深入到了原理与实现层面，并掌握了一些基本的分布式事务管理技术，如两阶段锁，两阶段提交等。

我觉得本项目的最大难点在于对整个系统架构的理解，即每一模块分别负责哪些职责，以及这些模块如何协作以构成一个功能完整的系统。弄懂整体架构以后，由于实现部分最难的锁和 RM 已经提供了绝大部分代码，所以在系统的实现上并不会有特别大的困难。

最后，我想对本课程实践项目提出两点个人建议，一是目前源码中存在大量的多余代码（如定义在接口中的字段默认是 public static final 的，不需要显式写在代码中），可以考虑对提供的 Source Code 进行重构，以消除这些多余代码。二是目前给的 Source Code 中提供了锁和资源管理器的绝大部分代码，而这一部分正是实现的难点之一，可以考虑将这一部分（在提供必要的指导下）也留给学生实现。