第三单元总结分析

OO2019课程

计算机学院

内容提纲

- 规格化设计回顾
- 基于JML的规格模式
- 基于JML规格的实现考虑
- 基于JML规格的测试与验证
- 博客作业

规格化设计回顾

- 规格是什么？
  - 类方法规格
  - 类数据规格
  - 抽象层次下的类规格（方法规格+数据规格）
- 规格有什么作用？
  - 对设计
  - 对实现
  - 对测试
- 如何写和用规格？
  - JML
  - 规格模式

规格化设计回顾

- 类是一个编程单位，用户一般把类作为一个整体来使用或重用
- 类规格定义了与用户的契约
  - 数据规格：类所管理的数据内容，及其有效性条件(invariant, constraint)
  - 方法规格：类所提供的操作，权利+义务+注意事项
- 类规格定义了开发人员必须实现的规约
  - 实现数据内容并确保始终有效
    - 使用抽象函数来确认有效性检查是否充分
  - 任意一个方法的实现都不能破坏对象的有效性
    - 不能破坏invariant和constraint
  - 任意一个方法的实现都要满足方法本身定义的规约

规格化设计回顾

- 方法规格是一个方法与其用户交互的契约
  - 契约：权利+义务+注意事项
  - 义务：用户要保证提供有效的输入以及有效的对象状态
  - 权利：用户能够获得满足确定条件的输出结果
  - 注意事项：方法执行过程中可能会修改用户对象的状态
- 方法规格是一个方法对实现者做出的规约要求
  - 规约：前置条件+后置条件+副作用
  - 前置条件：实现者可依赖的初始条件
  - 后置条件：实现者如何提供满足要求的结果
  - 副作用：不去做多余的事情

规格化设计回顾

- 类数据内容的撰写
  - 只需给出类所管理数据的最简单表达 (model, spec_public)
  - 命名应和其所表达语义有效关联
  - 数据类容对于用户可见
- 类有效性条件
  - invariant: 任何时刻数据内容都必须满足的约束条件
  - constraint：任何时刻对数据内容的修改都必须满足的约束条件
- 从用户角度来看，一个设计优良的类应保证所提供的操作
  - 完整性：应提供四类操作（构造、更新、查询和生成）
  - 紧凑性：不提供与所管理数据无关的操作行为
  - 便捷性：能够以简单的方式访问和更新所管理的数据
  - 安全性：阻止不受控访问，确保线程安全
  - 正确性：实现与契约一致

规格化设计回顾

- 抽象是OO的一个基本机制，可以形成类型层次
- 用户在使用层次化的类时倾向于进行一般化处理
  - 高层类型必须对低层类型具有概括性
    - 数据抽象的概括性
      - 子类数据抽象与父类数据抽象之间的关系：使用抽象函数来表示
      - 子类对象有效性与父类对象有效性之间的关系
    - 行为的概括性
      - 父类方法规格与子类方法规格之间的关系
  - 凡是使用高层类型引用的对象都可以替换成低层类型所构建的对象，且保证程序行为不会变化（LSP）

规格化设计回顾

- 子类与父类独立，但也继承了父类的规格
- 从规格的语义角度，层次之间具有严格的逻辑关系
  - 子类的不变式与父类的不变式
    - I_Sub(c) ==> I_Super(c)
    - I_Super(c) =!=> I_Sub(c)
  - 子类重写方法的前置条件与父类方法的前置条件
    - Requires(Super::f) ==> Requires(sub::f)
    - Requires(Sub::f) =!=> Requires(Super::f)
  - 子类重写方法的后置条件与父类方法的后置条件
    - Ensures(Sub::f) ==> Ensures(Super::f)
    - Ensures(Super::f) =!=> Ensures(Sub::f)

Requires(Super::f) <==> Requires(sub::f)
Ensures(Super::f) <==> Ensures(sub::f)

规格化设计回顾

- **WARRANTY**方法
  - 本质上是设计问题
  - Step1(**W**hy): 为什么需要这个方法？
  - Step2(**A**cceptance criteria): 这个方法所提供结果正确的判定条件是什么？
  - Step3(clea**R** **R**equirement): 这个方法是否需要对调用者做出一些要求，从而确保能够产生正确结果？
  - Step4(**AN**ticipated changes): 这个方法执行期间是否需要修改输入数据或者所在对象数据？
  - Step5(**T**rust**Y**): 无需代码即可确认其语义

规格化设计回顾

- 契约式设计是一种基于信任机制+权利义务均衡机制的设计方法学，JML源自于契约式设计的需要
- 信任机制
  - 类提供者信任使用者能够确保所有方法的前置条件都能被满足
  - 类使用者信任设计者能够有效管理相应的数据和访问安全
- 权利义务均衡机制
  - 任何一个类都要能够存储和管理规格所定义的数据（义务）
  - 任何一个类都要保证对象始终保持有效（义务）
  - 任何一个类都可以拒绝为不满足前置条件的输入提供服务（权利）
    - 或者通过异常来提醒使用者
  - 任何一个类都可以选择自己的表示对象而不受外部约束（权利）

规格化设计回顾

- 规格化设计是一种致力于保证程序正确性的方法
  - 正确性：在规定的输入范畴内给出满足规定要求的输出
    - “你”如果能够保证前置条件成立，“我”就能保证后置条件成立
  - 正确性基础
    - 规格满足需求
    - 实现满足规格
- 规格化设计的核心
  - 方法的前置条件
  - 方法的后置条件
  - 对象的不变式

基于JML的规格模式

- 规格模式：一种构造规格表达结构的模式，design pattern面向软件功能，规格模式面向规约式的规格表达。
  - 规格是关于软件模块的设计
  - 规格模式是关于规格的设计
- 不同于维基百科上的specification pattern，这是一种design pattern，讨论如何简化一个模块的接口设计
- 规约逻辑与代码逻辑（构造逻辑）有显著差异
  - 规约逻辑不关心如何得到相关数据（中间数据或最终数据），只关心相关数据必须满足的约束条件
  - 构造逻辑关心如何通过数据结构和计算步骤来获得相关数据

基于JML的规格模式

- 约束类别
- \result数据内容角度
- 基于推导数据的约束
- 基于构造性数据的约束
- 约束组合与共性提取

基于JML的规格模式

- 约束类别
  - 绝对约束 ~ 相对约束
- 绝对约束
  - 可以直接对\result的取值范围进行约束
  - \result > 0, \result == x;
- 相对约束
  - \result与输入参数和this之间应该满足的约束

```
/*@ requires index >= 0 && index < size();
    @ assignable \nothing;
    @ ensures \result == nodes[index];    @*/
  public /*@pure@*/ int getNode(int index);
```

基于JML的规格模式

- 往往需要检查方法输入的不同情况，对应着不同的\result规约
  - (fromNodeId != toNodeId)
  - (fromNodeId == toNodeId)
- 使用蕴含关系来进行规约
  - (fromNodeId == toNodeId) ==> \result == 0;

基于JML的规格模式

- \result所引用的可能是一个数据容器，需要检查
  - 容器中元素个数
  - 每个元素都必须满足的约束
  - 某些元素所满足的约束
  - 存在性约束
- int[] select(int max): 从IntSet中选出所有不大于max的元素
  - 该选出多少个？
    - 其实不关心
  - 每个选出来的元素都必须满足的条件？
    - 对于\result中每个元素x，x<=max && isIn(x)
  - 对于IntSet中每个<=max的元素，都在\result中
- 本质上是规约**大小容器**之间的关系
  - IntSet是大容器，select方法返回的是小容器

Path[] getPathwithNode(int node): 返回PathContainer中所有经过node的path

基于JML的规格模式

- 有时需要对\result中数据的推导特性进行约束，而不是简单对每个数据进行约束
  - 推导特性：\max, \min, \sum, average…
- 推导特性是在\result的数据中进行推导计算获得的一个特性
- Course[] getCoursewithAvgMark(double avg, doule eps)
  - CourseManager，查询那些平均成绩在[avg-eps, avg + eps]范围内的课程
  - Course: CourseSelection[];
  - CourseSelection: courseID[], stuID[], double mark;

基于JML的规格模式

- 很多时候\result是某个中间数据的统计结果，而这个中间数据往往必须使用构造性算法才能产生，这时就难以直接对\result进行约束
  - int getReachableNodes(int fromNodeId): PathContainer，返回从fromNodeId可达的不同节点个数
  - **关键是构造可达节点集**

基于JML的规格模式

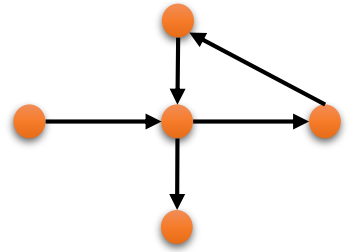
- 最优化求解方法的规格
  - 最优化求解方法：按照给定的目标函数(objective function)从复杂容器中提取相关对象的方法(满足目标函数)
  - 常见例子：求最短路径、求最大连通子图、求最长公共子串等
- getShortestPathLength

Objective function:
$\exists p(f,t) \in this, \forall p'(f,t) \in this, p(f,t).length \leq p'(f,t).length$

```
/*@ normal_behavior
   @ requires …;
   @ ensures  (fromNodeId != toNodeId) ==> (\exists int[] snodes; snodes[0] == fromNodeId && snodes[snodes.length - 1] == toNodeId &&
   @       (\forall int i; 0 <= i && i < snodes.length - 1; containsEdge(snodes[i], snodes[i + 1]));
   @    (\forall int[] cnodes; cnodes[0] == fromNodeId && cnodes[cnodes.length - 1] == toNodeId &&
   @       (\forall int j; 0 <= j && j < cnodes.length - 1; containsEdge(cnodes[j], cnodes[j + 1]));
   @    snodes.length <= cnodes.length) && \result == snodes.length);
   @    ensures (fromNodeId == toNodeId) ==> \result == 0;
   @ …
   @*/
public /*@pure@*/ int getShortestPathLength(int fromNodeId, int toNodeId) …;
```

基于JML的规格模式

- 中间数据的构造甚至需要几层才能规约清楚\result
- P11中多个接口涉及换乘概念
  - 首先必须回答什么是换乘
  - 构造相应的中间数据来表达换乘逻辑
  - 提取出换乘站点
  - Note：一条路径中可能存在环路



Path中也存在shortestPath问题，因此为Path引入getShortestPathLength(from, to)

```
@ ensures \result == (\exists int[] tn_idx; tn_idx.length == pseq.length * 2; pseq[0].getNode(tn_idx[0]) == fromNodeId &&
@    pseq[pseq.length - 1].getNode(tn_idx[tn_idx.length - 1]) == toNodeId &&
@    (\forall int i; 0 <= i && i < pseq.length - 1; pseq[i].getNode(tn_idx[2 * i + 1]) == pseq[i + 1].getNode(tn_idx[2 * i + 2])));
```

```
@ ensures (\exists Path[] tpath; isConnectedInPathSequence(tpath, fromNodeId, toNodeId);
@       (\forall Path[] spath; isConnectedInPathSequence(spath, fromNodeId, toNodeId);
@          tpath.length <= spath.length) && \result == tpath.length - 1);
```

基于JML的规格模式

- 对于复杂的构造式规格，如果不引入组合机制，将使得规格不具有可读性
  - 规格的可读性越差（主要因为复杂度太高），意味读错的可能性就越大
  - 形式化方法工程应用受限的一个重要原因
- 规格的组合机制
  - 根据构造需要，逐层构造并组合
  - 本质上和层次化设计类似
  - 构造path序列来实现(from → to),从而可以讨论这个序列的长度等特性
  - 然后讨论这个序列必须满足的性质
    - path内连通，path间汇合

基于JML的规格模式

- 类中多个方法的规格往往需要构造相同的中间数据
- 类中多个方法的规格往往需要对相同的数据内容进行限制
- 应用共性提取机制，增加相应的方法规格，并应用组合机制来简化规格的设计结果
- 如果多个方法都需要构造相同的中间数据，说明需要为这个类构造相应的规格数据内容
  - 设计：数据内容提取简化规格设计
  - 实现：用冗余存储换来性能提升

规约这种设计思维在很多地方使用，递归设计、函数式编程、约束求解模型设计等。其核心是首先提出并规定预期结果所满足的约束，然后才会有过程式算法实现。

基于JML规格的实现考虑

- 规格定义了数据内容和方法规约，是实现的依据
- 规格实现
  - 选择合适的数据结构和数据表示对象
  - 选择合适的算法来实现方法
- 需要重点考虑的几个问题
  - 数据容器的选择
  - 中间数据的存储和检索
  - 规格的层次化
  - 算法的选择

基于JML规格的实现考虑

- 在大部分情况下，我们不会对模块内部细节设计进行规约，主要对模块接口进行规约
- 首先还是架构设计，在此基础上来实现规定的规格
- 绝不是对照规格来机械的实现代码
- 基于数据抽象的实现设计思路
  - 规格规定了要管理哪些数据内容？要对数据进行什么处理？
  - RailwaySystem要求提供票价、换乘次数、乘客满意度度和连通图结构的查询操作，以及从Graph继承来的连通性、最短路径等查询操作
  - 核心是图(Graph)这个数据结构

基于JML规格的实现考虑

- 该使用什么样的数据结构来表示抽象数据
  - 规格只说明数据内容
  - 经典的类设计问题
- 该选择什么样的数据容器
  - 数据访问特征
    - 是否频繁访问某些数据(提前并不可知)
    - ArrayList比LinkedList要好
  - 数据约束特征
    - 是否允许重复元素
    - 是否有pair型数据（path与pathId）

基于JML规格的实现考虑

- 构造性规格定义了中间数据，这表明要实现这样的规格通常也需要相应的中间数据
- 中间数据如何表示和存储
  - 数据结构设计和容器选择
- 中间数据往往是根据特定功能而存在的数据，容易发生变化
  - 必要时可展开层次化抽象，剥离变化部分，把不变成分独立出来
  - Graph的节点与边结构保持稳定
  - Graph的边权则有多种形态
  - ➔可以定义多种WeightedEdge，Graph层次使用Edge来管理结构

基于JML规格的实现考虑

- 规格中广泛采用层次化设计和组合机制
  - 是不是必须实现这种层次化结构？
- 不是*必须*，但大部分情况下*应该*
  - 规格的层次化往往反映了设计者的架构思考
- 如果实现者有更好的架构考虑，则可以不按照规格中的层次来设计实现
- 算法考虑应该与架构考虑配合起来
  - 核心还是数据抽象层次

基于JML规格的实现考虑

- 任何一个方法都需要主动去规划有哪些异常
  - 即导致自己的计算无法按照“正常流程”进行，从而不能满足后置条件的状况
- 通过显式的方式在规格中声明相应的异常
  - 标题声明（编译器要求）
  - 后置条件归纳（把不能满足后置条件的情况也纳入到“能够满足”）
- 捕捉异常状况的发生
  - 对输入条件和对象状态的判断
  - 通过try机制来捕捉被调用方法抛出的异常(Exception)
  - 通过try机制来捕捉虚拟机或运行平台抛出的异常(Runtime Exception)
- 异常的处理
  - 记录异常信息
  - 屏蔽局部异常
  - 反射局部异常

基于JML规格的实现考虑

- 从契约设计角度，方法需按照后置条件抛出相应的异常
- 从契约使用者角度，需了解被调用方法所可能抛出异常的场景和条件
  - 从而获得对状态的准确推理
  - Exception一般并不能携带有效的状态信息
- 从契约使用者角度，需要评估被调用方法所可能抛出异常对自己处理流程的影响
  - 统一处理：无实质性影响
  - 分类处理：影响需要区分
  - 反射处理：对更上层的用户也可能产生影响

本单元设计案例解析

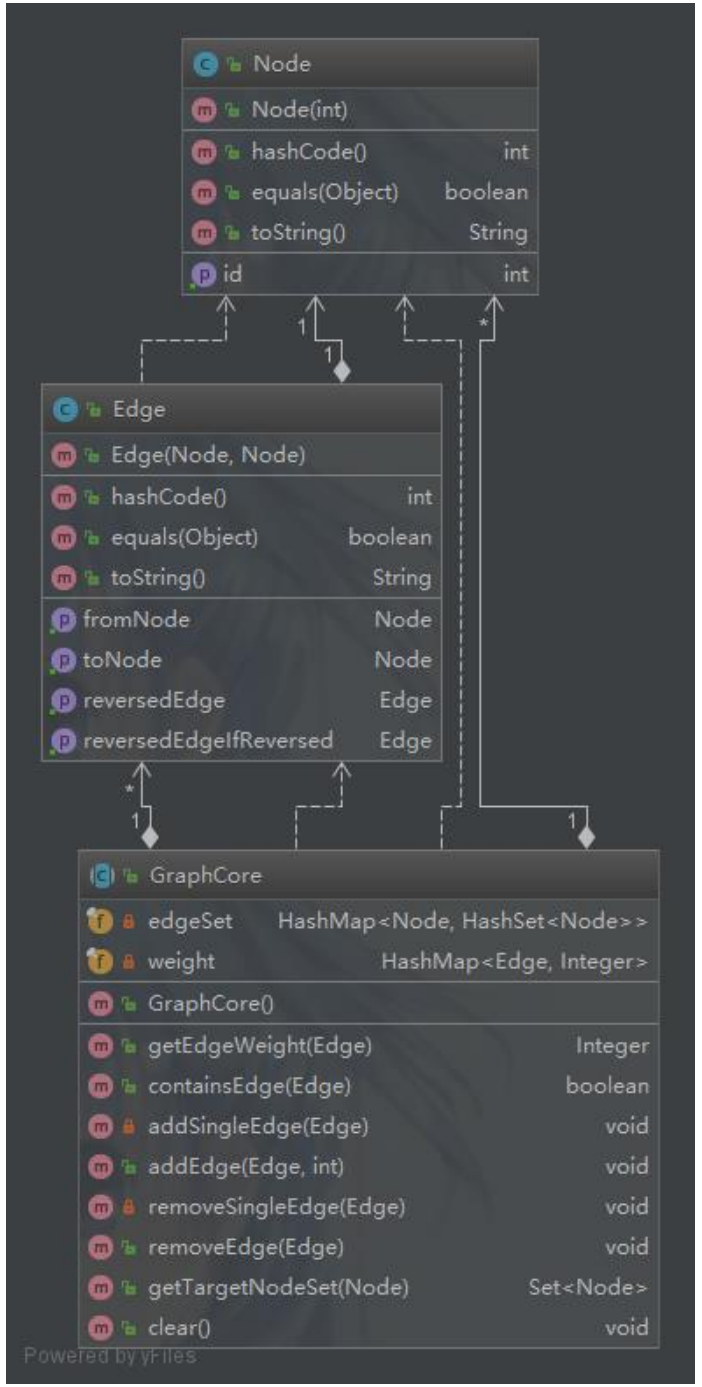
- 通过规格可以发现：
  - 需要对{path}进行基本的增、删、查、改管理
  - 需要求解最短路，以及依附于最短路的其他计算（如最少票价、最少换乘等）
- 进一步分析几种不同的最短路：
  - **计算模型基本一致**：相同连接结构+不同的边权设置
  - 容器中管理的{path}会随输入发生变化，并**引发图结构变化**
  - 在数据量较大的情况下，每次图的变化都**重新计算**，显然不是一个好办法
  - 应当采用增量式方式，**充分利用之前的数据，使得计算过程变得平滑**
- Project给定的是“后验”的{path}，需要实现者自行决定如何从中提取信息来构造图
  - 图结构
  - 从{path}构造图
  - 根据接口要求构造具有不同边权的图
  - 缓存中间计算结果，提高计算效率
- 架构考虑
  - 层次化设计，把上述几个数据抽象独立成层次
  - **不只是降低复杂度**，还带来了功能扩展的便利
    - 可以定义有向边，有向图
    - 可以定义新的节点连接方式
    - 可以定义新的边权模式

基础层

- **Node** 表示节点类
- **Edge** 由两个Node组成，表示一条弧
- **Path** 即作业中要求的Path类，表示一条路径

数据抽象结构层 – 图

- GraphCore封装图数据结构
  - 有向图结构
  - 无向图结构
- 支持图数据结构的各种基本增删查改操作：
  - 增加边
  - 删除边
  - 改变边权
  - 基于某一点，遍历出边

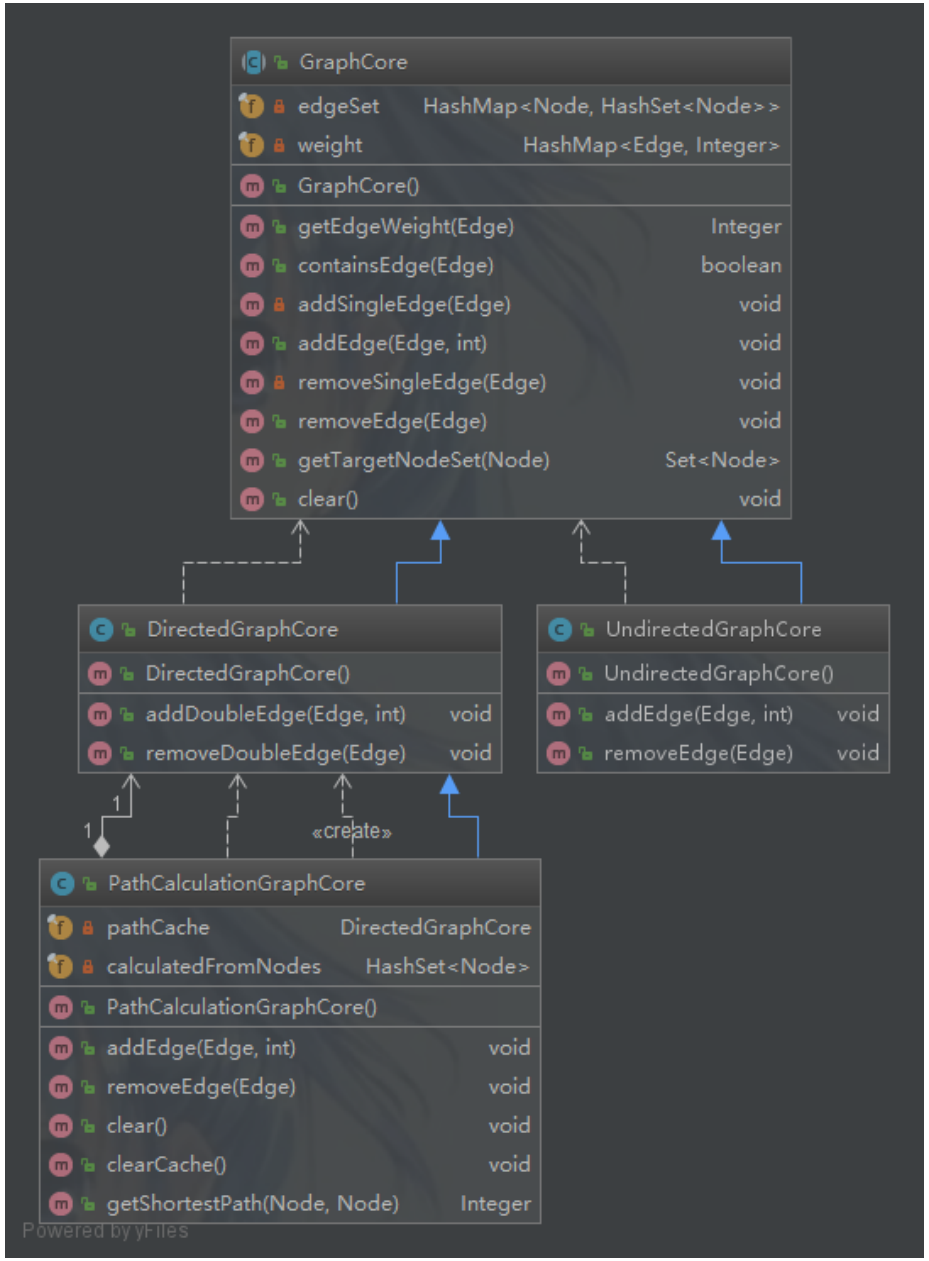


数据抽象结构层 – 路径容器

- 封装路径集合（PathContainer），形成容器
  - 增加路径
  - 删除路径
  - 查询路径

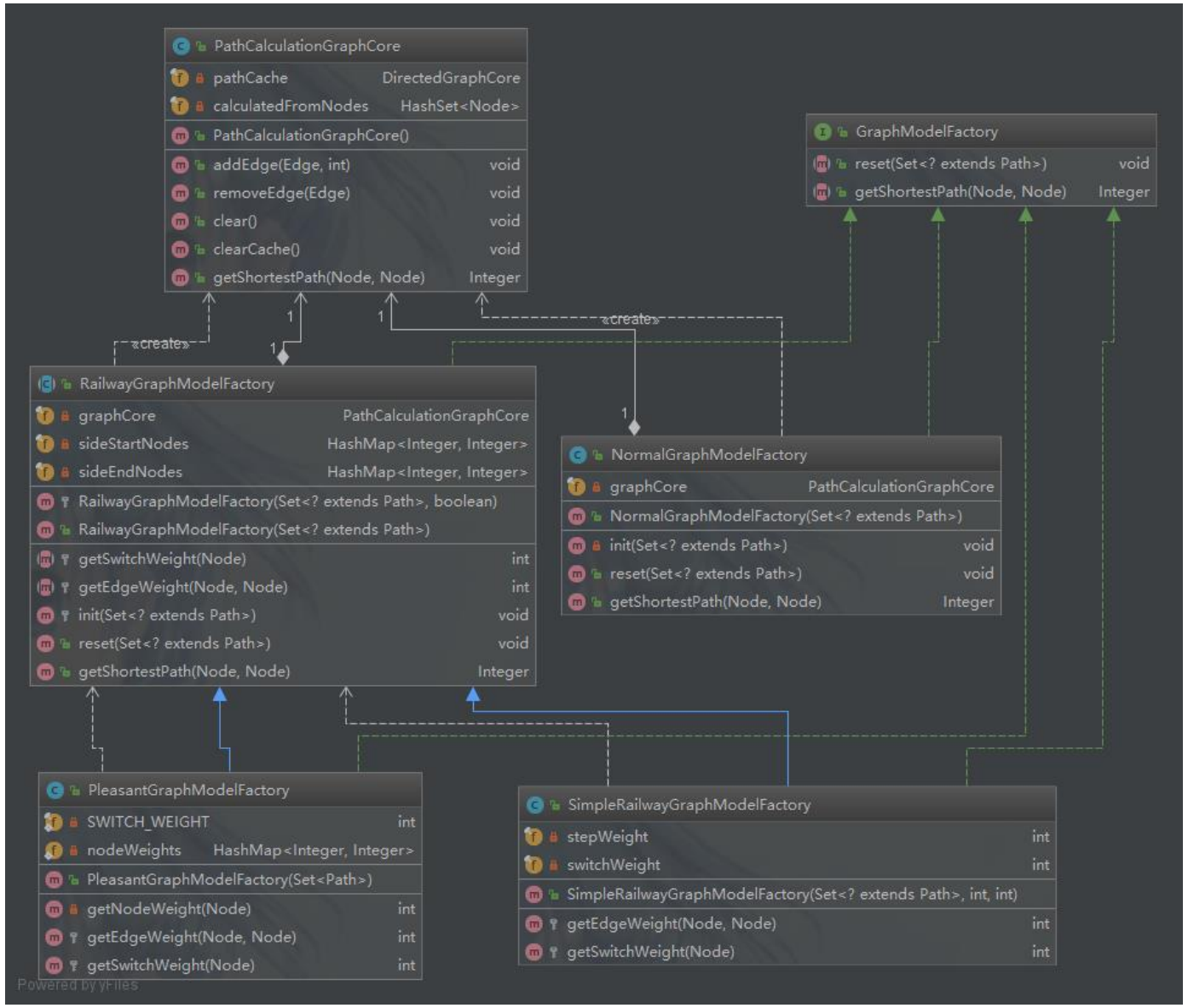
缓存计算层

- 使用组合模式，缓存计算所获得和涉及的路径，以及与相应节点的关系
  - 快速查询通过给定节点的边数
  - 快速计算(“查询”)最短路



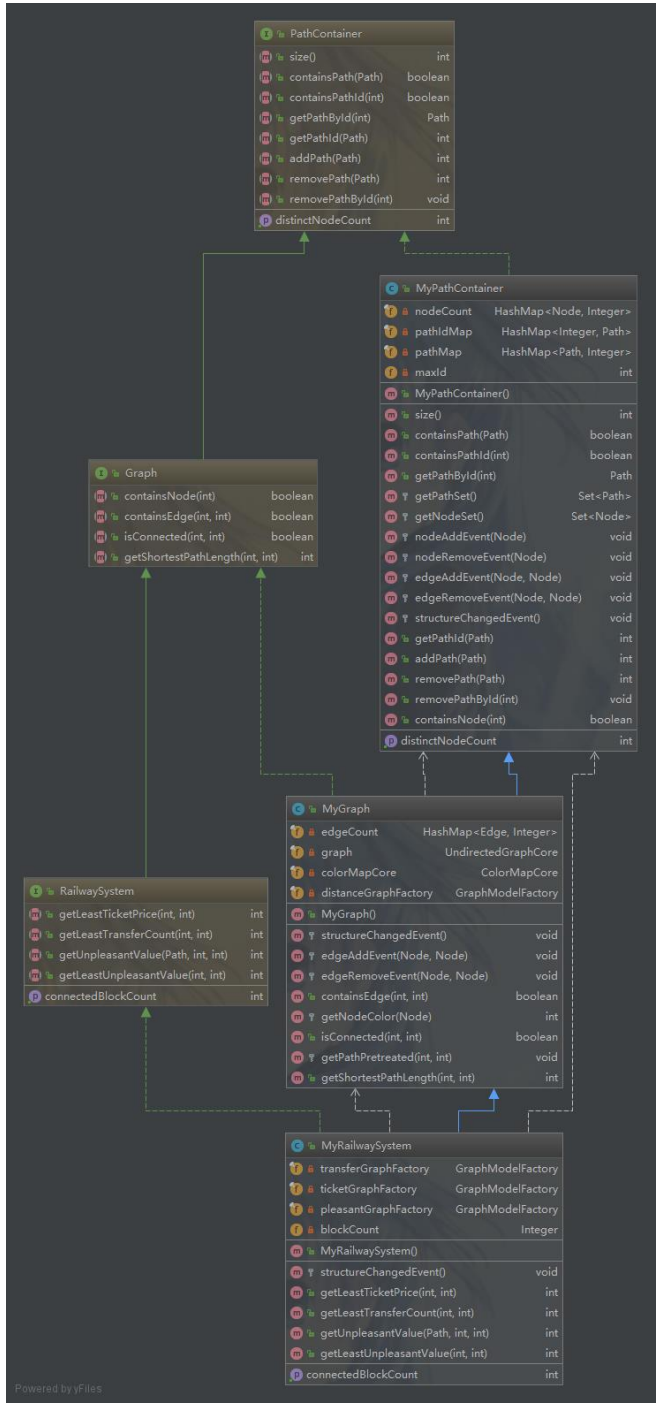
应用层次图的构建层

- 建图就是三件事
  - 从{path}提取节点及连接关系
  - 识别path内和path间的重复节点，构建长跨连接
  - 结合应用需要构建边权模式
- 功能考虑
  - 采用工厂模式，多种工厂
  - 采用组合模式来管理所构建的图，包括层次关系
  - 缓存路径计算的中间结果



应用层

- **PathContainer**：直接实现接口，使用Node和Set来构建应用
  - P9，PathContainer既是基础结构，又提供了应用层次功能
- **Graph**：整合{path}，形成层次化结构
  - P10，基于PathContainer，涉及Graph和Graph构建
- **RailwaySystem**：涉及多种形态的边权配置和换乘概念
  - P11，分离Graph和GraphModelFactory，具有更灵活的扩展能力
- 实现层次结构与规格层次结构保持一致
  - PathContainer <-- Graph <-- RailwaySystem
  - MyPathContainer <-- MyGraph <-- MyRailwaySystem



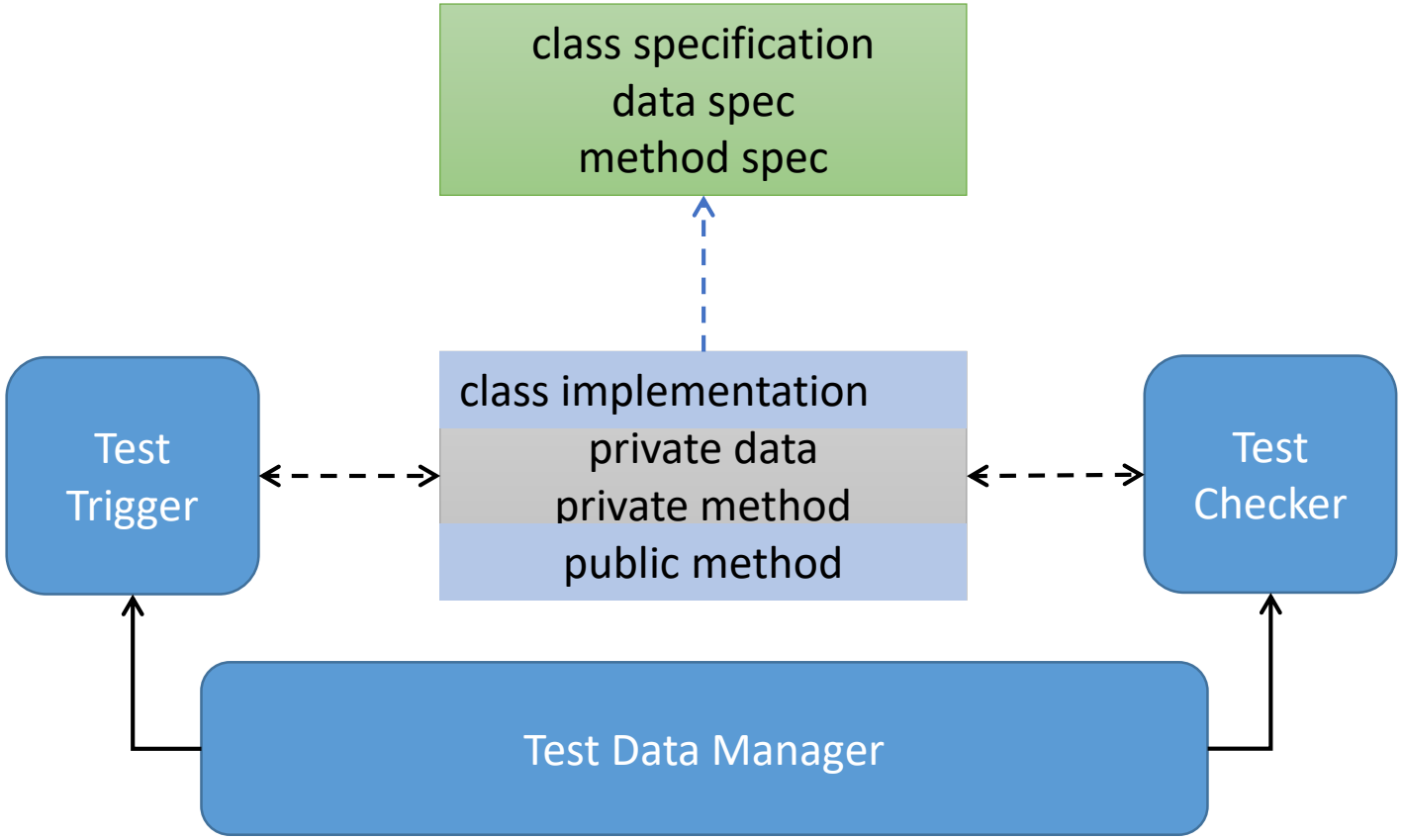
设计案例解析

- 识别易变和不易变结构，独立表示和处理
  - 图结构是基础结构，不会变
  - 变化的是图实例，即图模型
  - 由此建图手段需要适应性变化
- 设计时应考虑未来的扩展性
  - 比如边权有无增加新的模式，甚至可能动态变化？
  - 比如图模型结构的变化会带来多重计算，是否支持动态更新图模型？
  - 可使用**Event-chain机制，预留出事件捕捉接口**（addNodeEvent, addEdgeEvent, structureChangeEvent等）和相应的触发处理机制

基于JML规格的测试与验证

- JML为测试提供了划分依据和判定依据
  - 依据前置条件的测试划分
  - 依据规格数据内容的状态设置→测试场景
  - 依据后置条件和不变式的测试检查
- 应使用Junit来实现测试执行的自动化

基于规格的测试：Framework



- Test Trigger
  - 使用Test Data来构造被测对象(测试准备)
  - 使用Test Data来发起测试动作(调用被测对象方法)，并获得方法执行结果
- Test Checker
  - 使用Test Data直接对方法执行效果进行检查
  - 使用Test Data和被测对象的查询方法来对方法执行效果进行检查
- Test Data Manager
  - 针对被测类的data spec和method spec所设计的针对性数据
  - 提供数据访问和更新接口

基于规格的测试

- 规格为Test Trigger, Test Checker和Test Data Manager提供了设计依据
  - test a *class implementaion* according to its *specification*
- 测试目标
  - 每个方法是否都满足规格？
  - 是否在任何使用场景下，类都能确保状态正确？
- 测试有效性问题
  - 需要多少组测试数据？
  - 测试覆盖了多少代码成分？

基于JML规格的测试与验证

- 除了测试，还可以进行形式验证
  - 检查代码实现是否满足规格
- 使用抽象函数在规格数据和实现数据之间连接
- 单一层次的验证
  - 方法执行结果是否与方法后置条件相符
  - 方法执行结果是否违背不变式或修改约束
- 跨层次验证
  - 基于LSP原则
  - 关键是重写方法

基于JML规格的测试与验证

- 可以通过可测试性设计来进行验证
  - 在代码中内置检查手段
  - 测试和验证相融合
- 构造不变式检查方法：repOK
- 根据方法的前置条件，设置对象的状态
  - 调用repOK
  - 调用相应方法
  - **检查方法返回结果是否满足后置条件**
  - 调用repOK
- 方法后置条件也可以自动检查
  - 为类的每个方法独立实现一个专用于测试的***ensuresOK方法
    - 一般化方法
  - 专门建立一个(输入,期望输出)配对表，拿到实际输出时与期望输出进行对比
    - 枚举式方法

作业

- 针对第三单元的三次作业和课程内容，撰写技术博客
  - (1)梳理JML语言的理论基础、应用工具链情况
  - (2)部署SMT Solver，至少选择3个主要方法来尝试进行验证，报告结果
    - 有可能要补充JML规格
  - (3)部署JMLUnitNG/JMLUnit，针对Graph接口的实现自动生成测试用例，并结合规格对生成的测试用例和数据进行简要分析
  - (4)按照作业梳理自己的架构设计，并特别分析迭代中对架构的重构
  - (5)按照作业分析代码实现的bug和修复情况
  - (6)阐述对规格撰写和理解上的心得体会

http://www.eecs.ucf.edu/~leavens/JML//download.shtml

http://insttech.secretninjaformalmethods.org/software/jmlunitng/release_history.html