

# 基于语义影响范围分析的补丁兼容性分析

(申请清华大学工程硕士学位论文)

培 养 单 位: 软 件 学 院

学 科: 软 件 工 程

研 究 生: 潘 晓 梦

指 导 教 师: 贺 飞 副 教 授

二〇一五年五月



Thesis Submitted to  
**Tsinghua University**  
in partial fulfillment of the requirement  
for the professional degree of  
**Master of Software Engineering**

by  
**Pan Xiaomeng**  
**( Software Engineering )**

Thesis Supervisor : Professor He Fei

**May, 2015**



# 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容。

本人保证遵守上述规定。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

作者签名：\_\_\_\_\_

导师签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_



## 摘 要

我还不知道写什么，就先这样吧。

关键词：

## Abstract

The software system will continue evolving in its whole lift time, and patch is a common way to accomplish the task to update or fix bug and so on. As the software evolving is rapid, how to identify whether a patch for a specific version of software is applicable for a newer version of the same software. We here present a so called patch compatibility analysis to try to fix this problem. It consists of three kind of analysis—program differencing which is used to output the structural difference of the two versions, change impact analysis which is used to analysis the impact of every change including dependency and impacted expressions/statements and so on. And at last, the conflict analysis used to determine whether the two patches' impact are conflictual.

**Key words:** T<sub>E</sub>X; L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X; CJK; template; thesis



## 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景和意义 .....	1
1.2 本文所要解决的问题与主要工作 .....	2
1.3 本文组织结构 .....	4
第 2 章 相关工作 .....	5
2.1 软件演进 .....	5
2.2 程序间差异分析 .....	5
2.3 程序变更影响分析 .....	5
2.4 相关工具 .....	9
2.4.1 git .....	9
2.4.2 Beyond Compare .....	9
2.4.3 jpf-regression .....	9
2.4.4 ASTro .....	11
第 3 章 分析方法 .....	12
3.1 问题定义 .....	12
3.1.1 补丁版本迁移 .....	12
3.1.2 语义影响范围分析 .....	14
3.1.3 兼容性分析 .....	16
3.2 应用场景 .....	17
3.3 解决方案 .....	17
3.3.1 补丁版本迁移 .....	19
3.3.2 语义影响范围分析 .....	20
3.3.2.1 程序差异性分析 .....	20
3.3.2.2 变更影响分析 .....	20
3.3.3 兼容性分析 .....	21
3.3.4 整体流程 .....	22

---

第 4 章 方法实现 .....	24
4.1 补丁版本迁移 .....	24
4.2 语义影响范围分析 .....	25
4.2.1 程序间差异分析 .....	25
4.2.2 变更影响分析 .....	25
4.3 兼容性分析 .....	25
第 5 章 兼容性分析算法 .....	26
第 6 章 实验 .....	27
6.1 补丁版本迁移 .....	27
6.2 语义影响范围分析 .....	27
6.2.1 程序间差异性分析 .....	27
6.2.2 变更影响分析 .....	27
6.3 兼容性分析 .....	27
6.4 结论 .....	27
第 7 章 结论 .....	28
7.1 工作总结 .....	28
7.2 未来工作 .....	28
参考文献 .....	29
致 谢 .....	30
声 明 .....	31

## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景和意义

软件维护（Software maintenance）是软件开发周期中耗时最长、开销最大的过程。随着外部环境和用户需求的不断变化，软件系统需要随之进行适应和调整，同时也需要修复在实际运行中暴露出来的问题。

在软件演进的过程中，软件系统可能会由于各种各样的原因而发生更新行为，这是软件维护周期中的常见活动。为了进行软件

补丁（Patch）就是这样一类可以用于完成修补程序漏洞、增强软件功能、改善程序性能等任务的程序。补丁在工业界中得到了广泛的实际应用，是软件维护过程的重要组成部分。

补丁一般是通过 Diff 工具而产生的文本数据，用于表示以行为单位的程序间差异性。一般而言，Diff 工具属于程序差别分析工具中的一种，单纯进行文本的差异性比较，并给出行级别的差异性信息。然而这样产生出来的差异性信息（即 patch），只包含了文本差异，而失去了语法、语义等差异信息。

然而，补丁程序仍然具有一定的局限性，它一般只针对某个专门软件版本而开发，对于软件演进过程中获得的新版本而言，我们无法确定补丁程序是否也能适用于新版本的程序。然而补丁程序的应用一般都具有特定的目的，例如功能升级、漏洞修补等，新版本的程序中很可能仍然需要补丁程序的应用来完善自身。

补丁程序通常会引入软件变更（software change），使得软件源代码在应用这些变更后可以实现功能修复、版本升级等目的。使用 Diff 工具所产生的补丁文件一般会以行为单位引入变更。

毫无疑问，软件变更不止会作用于修改的本行，由于软件代码的耦合性，单行变更就足以将变更带来的影响传播到软件系统的其他部分中去。因而，软件变更不仅会使软件系统发生结构化的变更，还会产生语义变化，例如对赋值语句的修改可能会影响到后续引用到该变量的条件语句。

因而，如何确定补丁程序对于软件其他版本的适用性是一个上复杂的问题，这主要是由于补丁程序所引入的软件变更和版本升级所引入的软件变更可能是互斥的，或者是部分互斥的，更准确的来说，是变更所影响到的程序语法和语义层面之间的互斥性。

可见，要完全确定补丁程序对其他版本代码的兼容性是一件事事实上比较困难的事情，目前就我们所知尚无这方面的相关工作出现。而且这方面的工作比较具

有实用价值，能够解决工业界的实际问题，因而本文尝试去解决这样一个问题。

## 1.2 本文所要解决的问题与主要工作

软件系统总是处于不断演进的过程中的。补丁 (patch) 是一种常见的软件系统版本演进的方法，常用于修补漏洞和缺陷、改进性能、升级等。在实际应用中，补丁往往针对某一个特定版本的代码而设计，然而现代软件系统往往更新换代较快，因而面临着将补丁应用于其他版本的代码时可能失效的问题。为了解决这个问题，我们为此提出了进行补丁兼容性分析的想法。

**定义 1.1:**  $diff(v_1, v_2)$ ——求两个不同版本的程序  $v_1$  和  $v_2$  之间的差异性，其结果即为补丁  $p$ 。

为此，我们考虑这样一个问题，针对软件系统  $s$ ，假设已有有版本  $v_1$  和  $v_2$ ，其中补丁  $p_1$  是针对版本  $v_1$  而设计，打上后会演进到版本  $v_3$ ，问  $p_1$  是否能够应用于版本  $v_2$ ，并保证不会发生冲突。从问题中可以发现， $p_1 = diff(v_1, v_3)$ ，设  $p_2 = diff(v_1, v_2)$ ，那么该问题就可以规约为，给定两个补丁  $p_1$  和  $p_2$ ，问二者是否会发生冲突。

为了回答这个问题，我们需要给出冲突的具体定义。

**定义 1.2:** 冲突 (Conflict)——指两个补丁所对应的不同变更集合之间存在互斥的交集，其中两条变更互斥指二者对同一行代码进行了修改，或者他们所修改了不同行代码，但其影响传播到了某行相同的代码。

上述定义是对冲突的非形式化的描述，对于冲突我们可以更形式化的定义如下。

**定义 1.3:** 形式化定义

对该问题而言，其答案可以分为多个层面来回答：

1. 语法：从语法角度出发，则该问题主要关注的是在应用过程中是否会造成语法结构上的错误，如果能够将补丁  $p_1$  成功应用于程序版本  $v_2$ ，则认为该补丁是可以兼容于新版本  $v_2$  的。语法结构上的错误可能是多种多样的，例如补丁中的要修改的代码不在原位置或已被删除、补丁中要添加的代码已经在该文件中存在等等，不一而足。

2. 语义：从语义角度出发，则单纯的语法兼容并不能够完全解答这个问题。某行修改可能会影响多处源代码，从而导致程序的行为发生变化。因而从语义层面而言，我们需要保证补丁  $p_1$  对程序版本  $v_2$  造成的语义影响不会波及到从版本  $v_1$  演进到  $v_2$  时所造成的语义变化。也就是说我们需要保证补丁  $p_1$  和  $p_2$  之间不会存在冲突——即互斥子集。

语法层面的回答很容易就能给出，现有的版本控制系统等都能在一定程度上给出相应的答案。而语义层面的答案，就目前所知尚未有这方面的工作。

因而本文将着重从语义层面尝试去解决这个问题。该问题可以较形式化地描述如下：

### 问题 1.1： 具体定义

目前而言，本文的主要工作包括以下几个部分：

#### 1. 补丁版本迁移

补丁  $p_1$  本来是适用于程序版本  $v_1$  的，如果想要适用于程序  $v_2$ ，可能需要进行一定的版本迁移工作。

该部分工作可以从语法层面给出兼容性的答案，并为了实现补丁兼容性而进行一定的语法结构修正。

这部分工作主要使用版本控制系统和文本合并工具完成。

#### 2. 语义影响范围分析

本文主要采用程序间差异分析、变更影响分析等手段来对界定补丁  $p_i$  对程序  $v_i$  所造成的语义影响范围。在有了补丁  $p_1$  和  $p_2$  的语义影响范围后，我们对其求交集即可获得互斥子集。

所谓的语义影响范围 (semantic impact area) 可以具体定义如下，其中 **structure** 意为程序语法结构，可以采用不同级别的程序语法结构（如 **statement**、**basic block** 等）进行分析，来获得不同粒度的影响范围：

(a)  $\text{change}(s) = \text{structure} \mid \text{structure 属于 } p, \text{ 并且 } \text{structure 发生了变更}$ ，该集合可以采用程序间差异分析获得。

(b)  $\text{impact}(s) = \text{structure} \mid \text{structure 属于 } p, \text{ 并且 } \text{structure 受到 } \text{change}(s) \text{ 的影响}$ ，该集合可以采用变更影响分析获得。

最后得到的  $\text{impact}(s)$  即为我们所需的变更的语义影响范围。

#### 3. 补丁兼容性分析

在有了语义影响集合  $\text{impact}(s)$  之后，可以进行具体的兼容性分析工作。通过求交集，我们可以获得两个补丁间的互斥子集，通过人工分析，我们可以判定该互斥子集是否存在误报 (false positive)，并筛选出真正的互斥子集。

我们可以简单的认定如果两个补丁间如果存在真互斥子集，那么他们之间就存在冲突。而实际上，真互斥子集中的一些互斥变更，根据我们的定义他们是互斥的，但在实际应用中他们其实仍然可能是互相兼容的。

如果对真互斥子集进行人工的补丁兼容性分析，可以将这些情况进一步剔除。

可见，我们给出的冲突定义是比实际冲突更加严格的定义，可能会造成一定的过高估计（over-estimate）。在第六章的实验中我们会给出具体的数据。

### 1.3 本文组织结构

本文主要包括七个章节，第一章是绪论，介绍本文的研究背景和主要工作；第二章主要介绍与本文所述内容相关的国内外的的工作；第三章主要介绍了补丁兼容性分析的具体方法；第四章主要介绍了如何将各阶段的不同分析方法进行整合，形成具体的流程；第五章详细介绍了具体的补丁兼容性分析算法；第六章介绍了实验过程和结果；第七章主要对本文的工作进行了总结，并提出了进一步的工作方向。

## 第 2 章 相关工作

### 2.1 软件演进

### 2.2 程序间差异分析

对于软件演进分析而言，如何确定一个程序的不同版本之间的变更是一个关键性的问题。程序间差异分析能够通过分析同一程序的不同版本间的差异，来确定版本间的变更集合。

按分析的深度而言，程序间差异分析可以分为三类：

- 文本差异：单纯的对比文本间的不同，这是最简单也最广泛应用的分析方法，如 Unix Diff 工具。
- 语法差异：对比并获得源代码间语法结构上的不同。
- 语义差异：对比并获得源代码间语义层面上的不同。

现有的帮助工程师进行软件维护和演进活动的工具往往都受限于低质量的变更信息。例如现在源代码的变更信息，往往都存储于版本管理系统中，如 CVS 等。他们会追踪对某个特定文件的文本行的增加/删除等操作，并没有考虑代码中的结构化变更。

考虑到源代码可以抽象语法树（Abstract Syntax Tree）的形式进行表达，可以考虑采用树间差异分析的方法来抽取出这些变更信息。Change Distilling 就是这样一类进行树间差异分析的算法。该算法能够从两棵 AST 之间寻找匹配节点，并找到一个能够令一棵树转化为另一棵树的最小变更集合，该变更集合即为所求的程序间差异。由于是从 AST 的实体和语句中抽取信息，该算法可以获取结构化的变更信息。

Change Distilling 中采用二元字符串相似性来匹配源代码语句，并使用子树相似性来匹配源代码结构（如语句、循环等）。在寻找变更集合时，它采用基本的树变更操作来描述源代码的变更，包括更新、删除、增加等。在实际的使用过程中，该算法可能会受限于如何找到合适数量的移动操作。

### 2.3 程序变更影响分析

软件维护是软件开发周期中最复杂、高成本和劳动密集的活动。软件产品天然的需要跟随系统需求的变更而进行适应和变化，以满足用户的需求。软件变更 (software change) 是软件维护 (software maintainance) 中的基础组件。变更可能从新

的需求、缺陷修复、变更请求等而来，当变更应用于软件时，他们不可避免的会带来一些副作用，也可能会与原软件的其他部分产生不协调。

而 CIA 正是这样一类用于确定变更对于软件其他部分的影响的技术集合，它在软件开发、维护和回归测试等过程中都起到着重要的作用。一般而言，CIA 可以用于程序理解、变更影响预测、影响追踪、变更传播、测试用例的选取等。

CIA 方法的分类：

- 基于追踪性的 CIA，追踪两个不同抽象级别上的元素间的依赖性，目的在于链接不同类型的软件工件（需求、设计等）
- 基于依赖的 CIA，致力于衡量变更的潜在影响，通常尝试去分析程序的语法关系，他们表示了程序实体间的一些语义依赖关系，或者说他们在同一个抽象级别上对软件工件实施了影响分析。现在最主要的这类 CIA 主要在源代码级别上进行研究。

软件系统上的变更可能导致不可意料的副作用，CIA 的目标就在于辨认这些副作用 (side effect 或者 ripple effect)，并防止之。CIA 从分析变更请求和源代码开始，以便获得变更集合 (change set)。最后实际获得的影响集合叫做 EIS (estimated impact set)，而真实的集合叫做 AIS (actual impact set)。

整个软件变更影响的分析过程可以大致分为以下流程，更详细的流程可以参考图 2.3。

1. 确定变更集合，需要针对变更请求进行分析，这步一般叫做特征定位 (feature location)，用于确认源代码中实现了对应功能的起始位置。
2. 衡量由变更集合引入的影响。这一步是目前大部分 CIA 技术的着重点。若按分析技术的类型划分，则主要的两类包括静态分析和动态分析。
  - 静态分析：历史分析、文本分析、结构分析。静态分析通过分析程序的语法、语义或者历史依赖实现，通常会产生很多错报 (false positive)。
    - 结构分析着重于分析程序的结构依赖性，构建依赖关系图
    - 文本分析根据注释和标识符提取出概念依赖性
    - 历史分析从多个软件演进版本中挖掘出信息



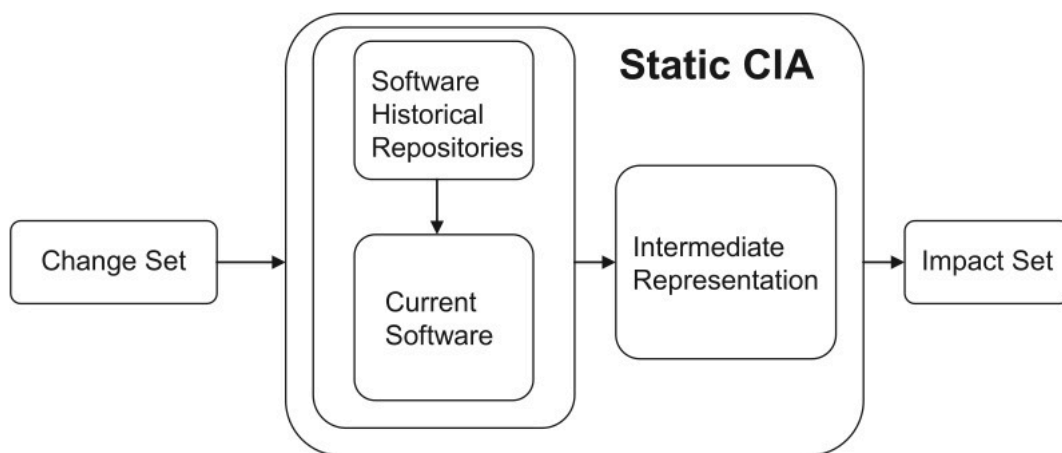


图 2.1 静态分析过程

- 动态分析：在线分析和离线分析。考虑特定的输入，并且依赖于程序运行时收集到的信息进行分析（如运行时的追踪信息、覆盖信息等）。其得到的影响集合往往比静态分析更高，但其开销也相应更大，而且通常包括误报（false negative）。
  - 在线 CIA 使用程序运行时收集的信息实施所有的分析

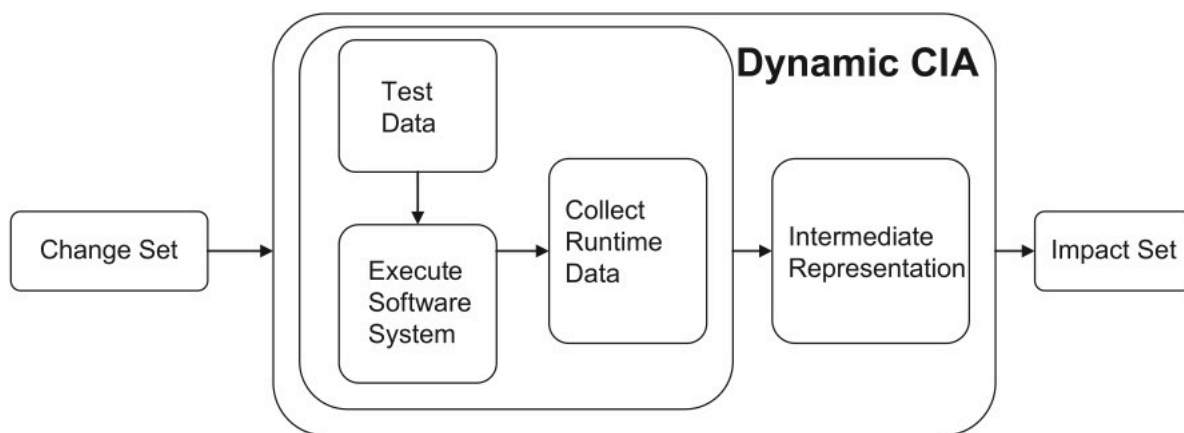


图 2.2 动态分析过程

近年来，有一些以 CIA 技术作为支撑而实现的工具，他们一般在实现 CIA 技术之后，利用得到的中间结果进行后续分析，帮助进行软件维护和演进。下面将对他们进行简要的介绍：

#### 1. Chianti：应用于 Java 程序，Eclipse 插件

应用场景：

- 使用回归测试来看变更以前的功能是否能正常使用
- 若失败了，利用 Chianti 进行变更影响分析，将 change 拆分成若干原子

change, 并分析他们之间的依赖关系, 结合原程序生成中间表示形式, 看可能是哪些部分影响到了 test 的运作

网址: <http://aria.cs.vt.edu/projects/chianti/> Ren X, Shah F, Tip F, et al. Chianti: a tool for change impact analysis of java programs[C]//ACM Sigplan Notices. ACM, 2004, 39(10): 432-448.

## 2. JRipples: 应用于 Java 程序, Eclipse 插件

应用场景: 利用 dependency graph 等, 自动标注可能受到被变更 class 影响的其他 class, 并展示出对应的变更传播路径。可利用人工标注来修正结果  
网址: <http://jrripples.sourceforge.net/>

## 3. ROSE: 应用于 Java CVS 工程, Eclipse 插件

应用场景: 挖掘软件代码仓库, 当用户对代码变更时提示用户可能相关的变更 (类似于 “变更了这个函数的人通常还变更了另一个函数”) 网址: <https://www.st.cs.uni-saarland.de/softevo/erose/>

## 4. jpf-regression: 应用于 Java 程序, Eclipse 插件/命令行工具

应用场景: 利用程序切片技术进行 change impact analysis, 利用得到的 impact sets 来驱动 symbolic execution, 获取被改变部分代码的行为 (path condition)

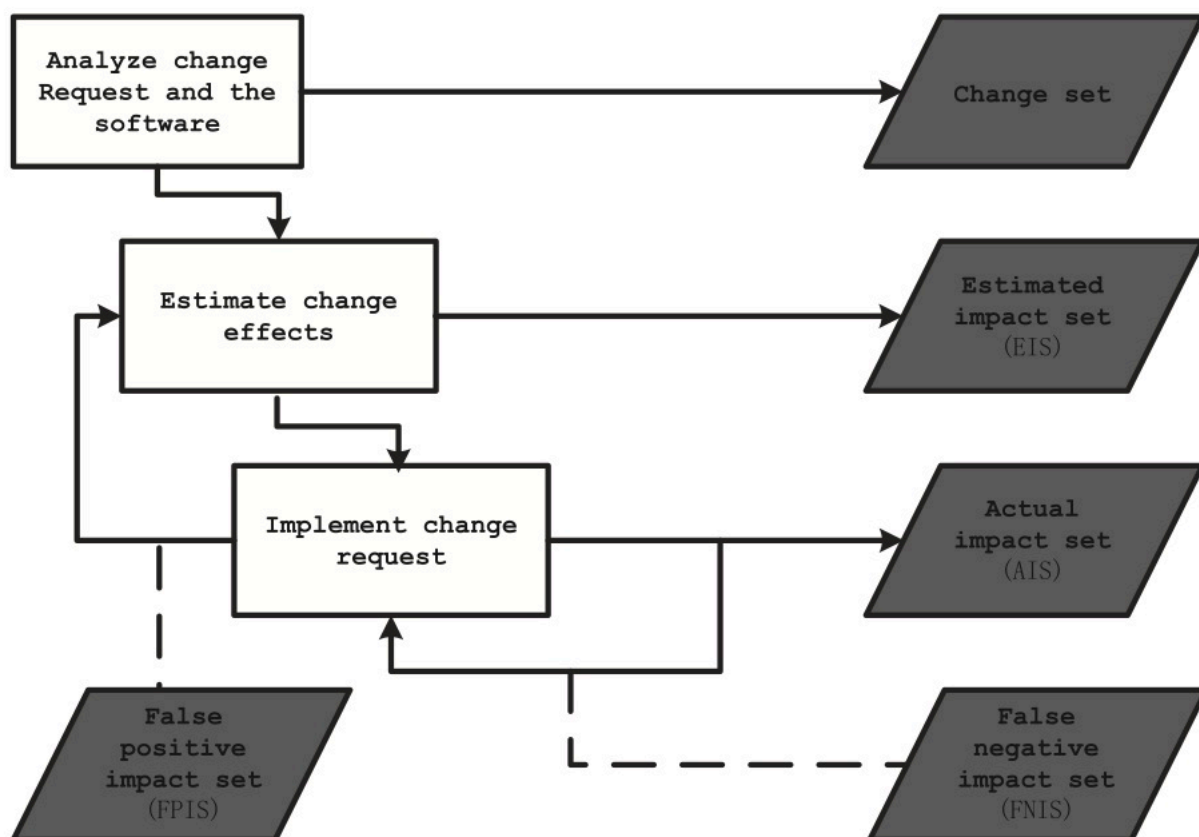


图 2.3 CIA 过程

## 2.4 相关工具

本节将主要介绍本文中采用到的相关工具。

### 2.4.1 git

git 是一个分布式的版本控制系统，最初由 Linus Torvalds 在 2005 年为 Linux 内核而开发，现在已经成为最流行的版本控制系统。

与 CVS 和 SVN 等集中式的 C/S 版本控制系统不同，git 是分布式的版本库，每个本地的 git 工作目录都包含了完整的历史数据和版本追踪能力，无需网络连接或服务端。

本文中主要考虑以 git 作为版本管理系统的应用场景，类似于 GitHub，假定项目开发了 new version 和 patch version 两个不同的分支，并使用 git 的分支合并策略实现补丁的版本迁移过程。

### 2.4.2 Beyond Compare

Beyond Compare 是一款内容比较工具，可以用于文件、目录、压缩包的比较，横跨 Windows、Mac OS X、Linux 三大操作系统，可用作版本控制系统的文本比较和合并工具，例如 git。

本文中主要采用其作为 git 的文本比较和合并工具，用于解决补丁版本迁移时的冲突（conflict）问题。

### 2.4.3 jpf-regression

变更影响分析常用于衡量软件变更的潜在影响。CIA 的结果通常可用做其他程序分析技术的输入，例如回归测试可利用 CIA 来确定程序的哪些部分需要进行再分析。而由于软件开发过程的演进特性，并且软件系统的大小和复杂性越来越高，刺激了人们对于有效的变更影响分析的需求。

一般而言，“单行变更”就足以引发广泛而未知的影响，因而变更影响分析在软件演进和维护过程中扮演着重要的作用。

目前，大部分的自动分析工具都将变更的影响以程序句法结构的形式表现出来，例如函数和程序语句。基于依赖的分析方法则通过分析程序组件间的内部关系来衡量变更的影响。这类技术能够以程序位置信息来描述变更的影响，然而却缺失了与受影响位置相关的程序运行路径的信息，而这类信息往往对于程序行为的验证、调试等起到很大的作用，而且能够将关注的范围缩小，只关注受到影响的程序行为集合。

(Directed Incremental Symbolic Execution) DiSE 能够结合静态分析的效率和符号化执行的精度, 分析方法内部的变更影响, 并描述程序变更对其运行行为的影响。

DiSE 的静态分析部分采用程序切片技术来衡量变更对代码中其他位置的影响, 其生成的影响集合可以用于引导符号化执行去分析受到影响的程序行为, 并生成对应的路径条件 (path condition), 这些路径条件用于描述受到影响的程序行为。这些路径条件之后可以利用 SMT 等技术进行求解, 用于后续的验证、调试等过程。

在 DiSE 方法中, 程序变更影响分析是其进行后续分析过程的基础, 它的变更影响分析过程主要特点在于:

1. 粒度: 语句级别。即具体的影响分析过程中, 以程序语句为基本单位进行影响集合的计算。
2. 影响范围: 方法内部。即以方法的作用域作为单次影响集合计算的限制范围, 最后得到变更对其所处的方法内部其他语句所造成的影响。也就是说不计算变更对于其他方法的影响, 即不考虑对方法内部函数调用的影响。
3. 影响来源: 主要从控制流和数据流两个层面考虑变更所造成的影响, 实际上采用了语句间的控制依赖和数据依赖关系进行计算。

DiSE 中, 受影响的集合主要分为两类:

- ACN: 受影响的条件语句节点 (affected conditional nodes)。
- AWN: 受影响的赋值语句节点 (affected write nodes)。

为了计算得到这两类影响集合, DiSE 中一共使用了四条规则来迭代计算, 从最初的变更集合出发, 不断应用规则向外扩展, 最后计算得到闭包, 即为所求的影响集合:

1. 如果 ACN 中有一个节点  $ni$ , 且存在一个条件节点  $nj$ , 其中  $nj$  控制依赖于  $ni$ , 那么将  $nj$  加入到 ACN 中。
2. 如果  $nj$  是一条赋值语句, 且控制依赖于 ACN 中的节点  $ni$ , 那么  $nj$  加入到 AWN 中。

前两条公式表明, 如果条件语句和赋值语句控制依赖于变更后的 CFG 中的节点, 那么他们就应当被加进来。

3. 如果 AWN 中的一条赋值语句节点  $ni$  对于变量的赋值在条件语句  $nj$  中被使用了, 且 CFG 中存在一条从  $ni$  到  $nj$  的路径, 那么将  $nj$  加入到 ACN 中。
4. 如果一个写语句节点  $ni$  对于变量的赋值在 AWN 或 ACN 中的某个节点  $nj$  被使用了, 且 CFG 中存在一条从  $ni$  到  $nj$  的路径, 那么将  $ni$  加入到 AWN 中。

jpf-regression 是 DiSE 的工具实现，它是基于 Java Path Finder 框架而实现的工具，可作为 Eclipse 的插件使用，支持 Java 语言。

#### 2.4.4 ASTro

本文中所采用的 AST 比较工具是由内布拉斯加大学林肯分校的 Josh Reed, Suzette Person 和 Sebastian Elbaum 等人所开发的 ASTro，它也是 jpf-regression 中使用的前置工具，用于对比两个不同版本的源代码，并获取其抽象语法树上的差异，以 XML 文件的格式进行输出。该工具支持 Java 语言。

## 第3章 分析方法

### 3.1 问题定义

第一章中对本文所要解决的问题进行了简要介绍和定义。

考虑到补丁间不兼容的实质是因为在应用时和应用后出现了错误，可以具体将错误分为两类：

**定义 3.1：** 兼容性错误——针对软件版本  $v_1$  的补丁  $p_1$  在应用到其他软件版本  $v_2$  时和之后可能出现的程序错误。主要分为两类：

- 语法错误：即出现语法结构上的错误。易由编译器发现。
- 语义错误：补丁  $p_1$  中的变更其语义和补丁  $p_2 = \text{diff}(v_1, v_2)$  的变更语义出现冲突，较难发现。

因而，可见为了判定补丁间是否相容，我们主要需要判定两个补丁间是否存在语义上的冲突。

在实际的工作中，我们发现该问题可以拆分为若干个子问题。因而我们可以采用分治的办法去逐步解决这些子问题，最后将其组合起来，即是对第一章中所述的问题的解决方案。下面将对这些子问题及其解决方法分别阐述并定义之。

#### 3.1.1 补丁版本迁移

**【给出问题定义：对补丁进行版本迁移】 【给出补丁版本迁移的定义】**

补丁程序是专门为某一版本的软件系统所设计，因而往往不能直接应用到其他版本的代码上，而且强行应用往往会出现很多错误。常见的问题可能包括：

1. 补丁程序中所提及的行不在原位置。
2. 补丁程序中所要删除的行其实已被删除，或者所要添加的行其实已被添加。
3. 补丁程序中所提及的文件未找到。

由于有这些可能的问题存在，导致我们无法直接将补丁程序应用到其他版本的补丁上。在这里我们先不考虑应用之后可能出现的语义错误，而尝试去解决可能出现的语法错误。因而这个问题可以如下定义之。

**问题 3.1：** 由于补丁  $p$  针对版本  $v_1$  设计，当尝试将其应用到版本  $v_2$  上时，可能会出现程序语法结构上的错误。如何实现补丁的版本迁移，将  $p$  成功应用到版本  $v_2$  上，并且不会出现程序语法错误？

为了解决这个问题，我们实际上可以采用版本控制系统的版本合并功能。

版本控制系统中经常需要将其他分支中的版本合并到当前分支中，为了解决不同版本之间可能存在的语法冲突，通常会采用三路归并算法（3-way merge）来对两个不同版本的代码进行合并，合并时以二者共同的祖先版本作为依据进行。

而我们所面临的问题也是类似的，由于  $patch(p_1, v_1) = v_3$ ，为了将  $p_1$  应用到版本  $v_2$  上获得版本  $v_4$ ，我们可以采用类似的想法，将版本  $v_3$  和版本  $v_2$  进行合并即可。合并后我们就等于同时拥有了  $p_1 = diff(v_1, v_3)$  和  $p_2 = diff(v_1, v_2)$  这两个补丁中的变更。

这实际上也是现在软件开发过程中的常见手段。例如使用 `git` 作为版本控制系统时，为了修复某个功能性的 `bug`，我们可以新建一个分支 `FixBug`，然后切换到该分支进行漏洞修复，等到修补完毕后，再将该分支合并到主分支 `Master` 中即可。

该过程如图3.1所示。

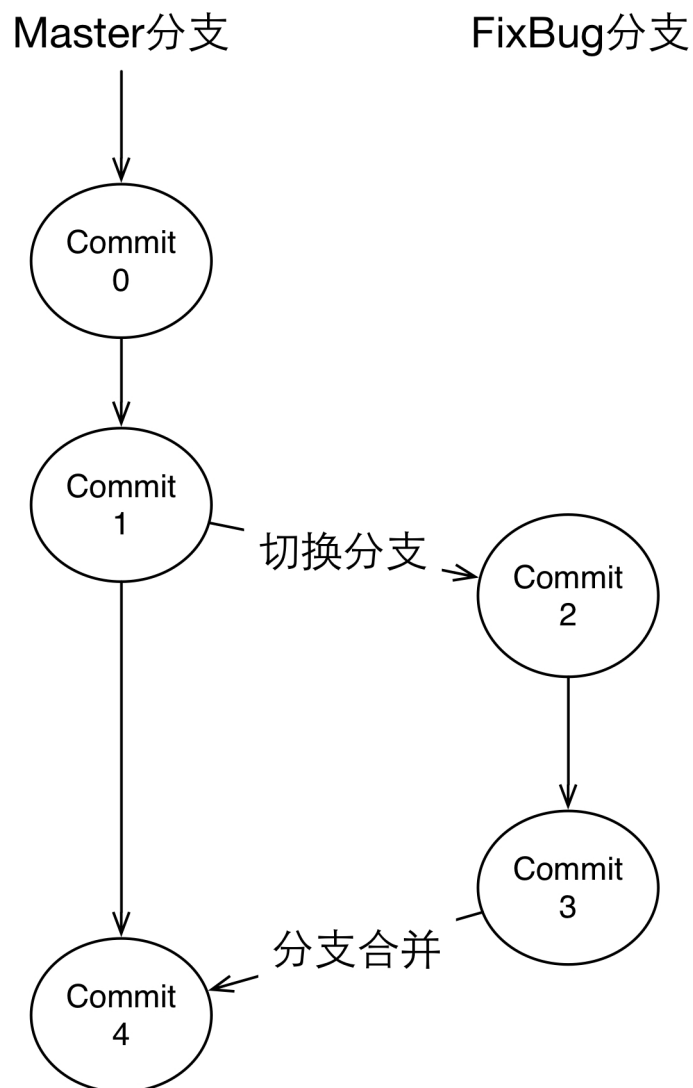


图 3.1 git 分支切换与合并

因而，我们可以将补丁版本迁移过程定义如下。

**定义 3.2：** 补丁版本迁移——将原本为软件版本  $v_1$  所设计的补丁  $p$  修改为可以在另一软件版本  $v_2$  上使用的补丁，使得应用补丁之后不会出现程序语法结构错误。

### 3.1.2 语义影响范围分析

**【给出问题定义：分析出变更的语义影响范围】 【给出语义影响范围定义】**

为了确定两个补丁之间是否存在互斥子集，我们需要从语义的角度入手。根据本文对互斥的定义，我们可以发现，我们主要需要从代码中挖掘中两类信息：

1. 代码的变更集合，即两个版本之间代码的差异性。



2. 变更的影响集合，即变更集合对代码中其他哪些部分会造成影响。

在有了这两类集合之后，我们就可以界定出软件变更在语义层面对代码的影响范围，我们可以将这整个过程称为语义影响范围分析（semantic impacted area analysis）。之后，我们可以通过比较两个补丁对代码的影响范围是否存在重叠来判定补丁间的互斥性。

因而，本节中的子问题主要在于如何界定软件变更对于程序的影响范围。

**定义 3.3：** 软件变更（Software change）——对软件代码做出的修改。其中变更可以划分为三类不同的表示方法：

- 文本：只考虑程序代码在文本行上的变化。
- 语法：考虑程序代码在语法结构上的变化。
- 语义：考虑程序代码在语义层面上发生的变化。

**定义 3.4：** 软件变更集合（Software change set）——补丁  $p$  中所涉及到的软件变更的集合。

**定义 3.5：** 程序结构——指程序的基础语法结构，包括类、方法、基本块、语句等不同级别。

**定义 3.6：** 影响范围（impacted area）——在程序的某个限定范围中，直接或间接受到变更影响的程序结构集合。

**问题 3.2：** 给定一个程序和他的变更集合，如何界定该变更集合对于其他程序结构的影响范围？

事实上，可以将程序中受变更影响的部分划分为不同的粒度，从而获得不同程度的影响，我们考虑对面向对象的编程方法中的影响元素级别进行划分：

1. 类：探讨变更对于其他类和对象的影响。对于面向对象的程序设计方法而言，这是最高级别的粒度。
2. 方法：探讨变更对于其他方法的影响。
3. 基本块：探讨变更对于其他基本块的影响。
4. 语句：探讨变更对于其他语句的影响。

而所谓的影响范围也需要界定其粒度，不同层级的粒度显然会对语义影响范围分析的精度产生影响。

1. 类间：考虑变更的影响可能延伸到其他类、对象。
2. 方法间：考虑变更的影响可能延伸到其他方法内部。

3. 方法内部：考虑变更的影响只在本方法的内部延伸。

在实际情况下，不同级别的影响范围均可分别采用不同的影响元素级别。

通过语义影响范围分析，我们就可以从代码中挖掘出所需要的变更影响信息，从而可以进行后续的兼容性分析工作。

在实际应用中，语义影响范围分析主要由两类分析过程组成：

1. 程序间差异性分析：获取两个软件版本间的差异性，获得结构化的软件变更信息。该分析过程即为  $\text{diff}(v_1, v_2)$  函数的具体实现。
2. 变更影响分析：分析软件变更对软件其他部分是否存在影响，并找到受影响的集合。该分析过程即为  $\text{impact}(p_1, v_1)$  函数的具体实现。

我们可以将整个分析过程定义为如下的函数：

**定义 3.7：**  $ia(v_i, v_j) = \text{impact}(\text{diff}(v_i, v_j), v_i), i \in \mathbb{N}, j \in \mathbb{N}$

### 3.1.3 兼容性分析

**【给出问题定义：分析判定补丁的兼容性】 【给出兼容性的定义】**

我们最后还是要落实到补丁兼容性的判定问题上来。在有了前面两个子问题的铺垫之后，我们就可以着手进行核心的补丁兼容性分析过程。因而该子问题可以定义如下。

**问题 3.3：** 给定两个补丁和他们对代码的影响范围，问这两个补丁是否兼容，即不存在语义冲突？

在有了软件变更的语义影响范围之后，我们可以通过简单地比较两个补丁对代码的影响范围是否存在重叠来判定其互斥性。

**定义 3.8：** 影响范围的重叠——即两个影响范围间是否存在交集，如果存在交集，则重叠，反之亦然。

显然，如果两个补丁对代码的影响范围不存在重叠，那么他们两者之间自然是兼容的，因为他们不仅本身的变更互不干涉，并且他们所影响到的程序结构也互不干涉。在这样的情况下，补丁是可以成功应用到其他版本上的代码，并且可以完成补丁本身的目标的。

如果影响范围发生了重叠，那么我们就可以认为补丁之间是不相容的，因为补丁所作的变更会对相同的程序结构产生影响。实际上这样的影响是否能够兼容需要人工的判定，因为在不同的情况下，他们可能是兼容的，也可能是不兼容的。

而我们无法从代码中获取到足够的信息来进行这样的判定，需要人类对于变更的期望信息作为辅助。

我们可以将这个过程的定义为如下类型的函数：

定义 3.9:  $isCompatible(diff(v_2, v_1), diff(v_2, v_4)) :: Patch \rightarrow Patch \rightarrow Boolean$

该函数接受两个补丁作为参数，并返回一个布尔类型的判定结果。

### 3.2 应用场景

本文中的主要问题在于如何判定一个针对给定程序版本的补丁，它是否能够应用于其他版本，并且与其兼容？为了使读者对这一问题更加清晰，我们可以考虑这样一个应用场景，并且有这样一些前提假设：

- 某个团队正在对一软件进行开发工作，该软件已推出一个正式版  $v_1$ ，现在正在进行  $v_2$  版本的开发。
- 该团队使用 `git` 作为版本管理系统，使用 `Github` 作为代码托管和团队协作工具。
- 该软件存在一个第三方开发的针对  $v_1$  版本的补丁  $p$ ，该补丁可以增强该软件的功能。

我们希望知道，该补丁  $p$  是否能够应用于正式版  $v_2$ ，并且补丁  $p$  的原目标能够实现，且不影响软件版本  $v_2$  的正常功能？

### 3.3 解决方案

【介绍补丁兼容性分析方法的整体架构：补丁版本迁移、语义影响范围分析（程序差异性分析、程序变更影响分析）、补丁兼容性分析】

考虑上两节中所提到的应用场景和子问题划分，我们可以给出这样一个解决方案来解决整个兼容性问题的判定。该解决方案的整体架构如图3.2所示。

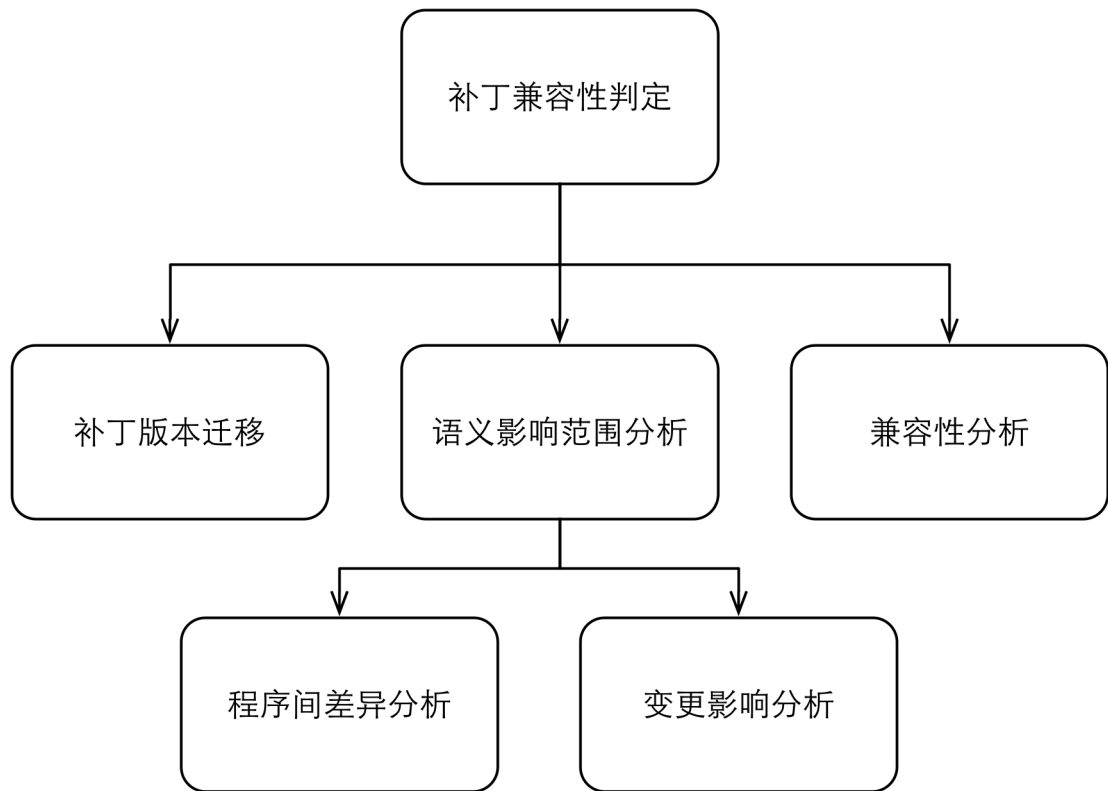


图 3.2 整体架构

可见，问题1.1的解决主要需要采用对应的解决方法分别解决三个子问题，最后再将其组合起来即可，是一个应用了分治法的解决方案。

因此，根据上一节中分解出的各个子问题，我们可以给出一个整体的补丁兼容性分析流程图，如图3.3所示。

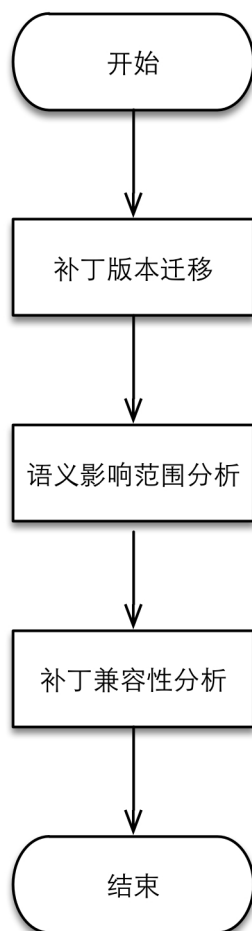


图 3.3 整体流程

下面我们将分别介绍各个模块的具体解决方案。

### 3.3.1 补丁版本迁移

如问题3.1中所述，我们可以采用 `git` 工具提供的三路归并算法进行补丁的版本迁移工作。具体来讲，其流程可以简述如下：

1. 采用 `git` 进行代码的版本管理，在主分支 `master` 中提交代码版本  $v_1$ 。
2. 切换到分支 `new`，并提交新版本代码  $v_2$ 。
3. 将补丁  $p_1$  应用到版本  $v_1$ ，获得旧版本应用补丁后的代码，其版本为  $v_3$ 。
4. 切换到分支 `patch`，并提交代码版本  $v_3$ 。
5. 切换回分支 `new`，将分支 `patch` 进行入分支 `new`，获得新版本应用补丁后的代码，其版本为  $v_4$ 。
6. 解决分支合并中可能出现的冲突问题。

其中，通过三路归并算法进行的合并工作中可能会出现冲突，这说明版本  $v_2$  和  $v_3$  之间存在语法冲突，即这两个版本在语法层面上不兼容。我们可以通过人工修改的方式进行修复，实现语法层面上的兼容性。

在解决冲突的过程中可以采用第三方的合并工具，利用现成工具的高效算法快速解决冲突，本文采用了广受好评的商业化工具 Beyond Compare。

### 3.3.2 语义影响范围分析

如问题3.2所述，我们需要进行语义影响范围分析来获取两个补丁的影响范围，用于后续分析使用。

实际上，语义影响范围分析主要分为两个分析过程，即程序间差异分析和变更影响分析，通过这两个分析的协作来完成整个语义影响范围的分析。

#### 3.3.2.1 程序差异性分析

程序差异性分析主要用于分析两个不同版本的程序间的差异性，其结果即我们所需要的程序变更集合。本文中主要采用 jpf-regression 工具提供的前置工具 ASTro 进行程序差异性分析工作。

ASTro 支持对 Java 代码的比对。它会比对两个文件的抽象语法树，并从中抽取出对应的不同之处，形成语法结构上的差异性，并输出为 XML 格式的文件以供后续分析过程使用。

该工具输出的 XML 文件将源代码按照抽象语法树的格式进行输出，其节点级别为基本块，并提供了丰富的差异性信息，如两个版本代码的对应节点是否发生了变更等。

利用这些输出信息，我们从中提取出程序的变更集合，从而进行后续的变更影响分析，

#### 3.3.2.2 变更影响分析

程序变更影响分析主要用于获取变更集合对其他程序结构的影响集合，该集合所包含的程序结构直接或间接地受到变更集合中的元素影响。该分析接受两个版本代码的变更集合为输入，并输出变更集合所对应的影响集合，也就是我们所需要的变更集合的影响范围。

本文中主要采用 jpf-regression 工具进行变更影响分析的工作。jpf-regerssion 是 DiSE 方法在 Java Path Finder 软件框架下的具体实现，提供了方法内和方法间的程序语句级别的变更影响分析。

jpfr-regression 工具中，变更影响分析只是其中的部分功能，因而我们在使用该工具时需要结合本文的实际情况进行一定的改进和修正。

在完成了上述两项分析工作后，我们就获得了两个不同版本代码的变更集合和对应的影响范围。接下来就可以进行具体的兼容性分析工作。

### 3.3.3 兼容性分析

在兼容性分析中，我们将对比两个版本代码的影响范围，确定他们是否重叠，以此为依据判断其兼容性。

理论上讲，这种简单比对即可发现两个版本间的兼容性问题，因为一旦发生重叠，那么重叠的代码部分显然是会发生兼容性问题的。然而在实际情况中，受限于工具的精度，我们往往不能达到理论上的准确度，而可能会发生误报（false positive）等情况。

显然，如果重叠不存在，则兼容性是可以得到满足的。而对于如何界定重叠部分的兼容性，则需要人工分析的介入，因为这部分代码的兼容性与补丁的功能目标密切相关，而我们无法从代码中获取到这种信息，因而只有依靠外界来提供，并以此为依据进行详细分析过程，界定这部分代码是否真的存在冲突。

在进行人工分析的过程中，我们不仅需要知道哪部分代码出现了重叠现象，而且还需要知道是哪些变更影响到了这部分代，因而我们需要引入影响追踪系统来记录变更影响分析过程的轨迹。影响追踪系统可以记录下变更影响分析过程中的每一步，从而获取到程序结构间的影响关系链，事后通过回溯即可追踪到具体的软件变更。

可以看得出来，由于使用了更严格的冲突定义，我们的方法会造成一定的过高估计的结果。

整个分析过程的架构如图3.4所示。

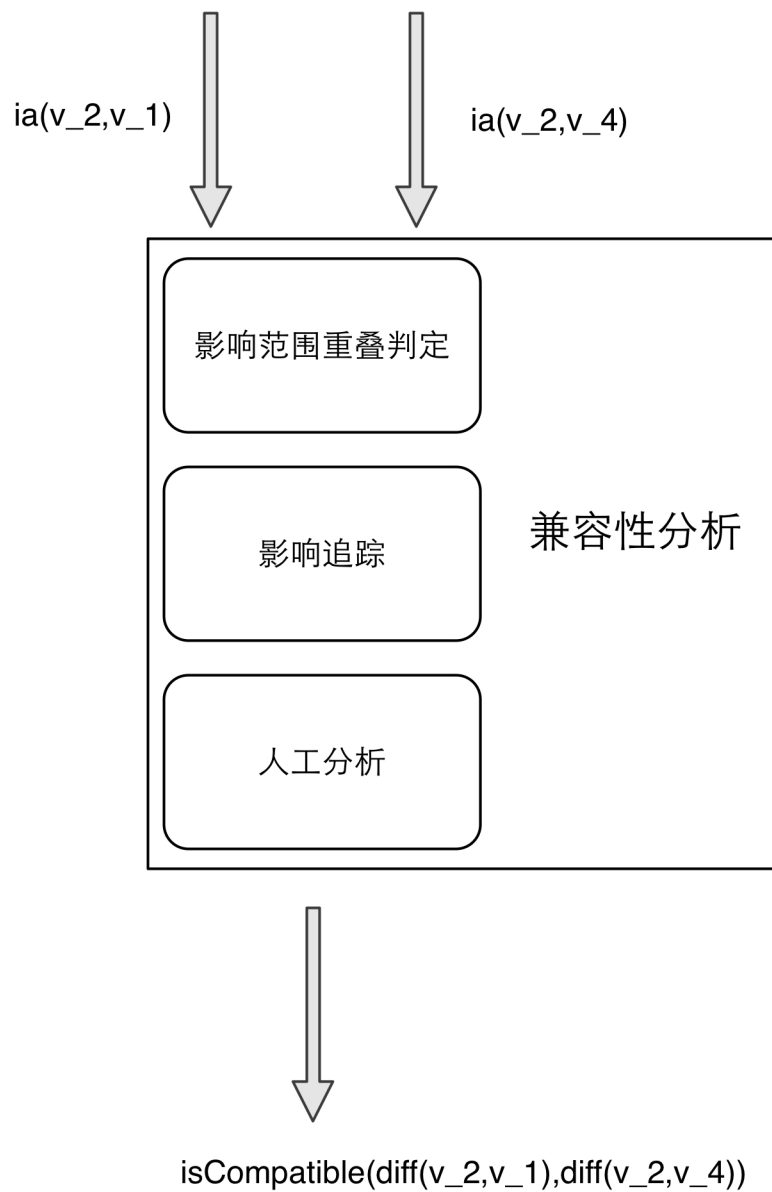


图 3.4 兼容性分析

### 3.3.4 整体流程

根据前三节中给出的解决方案，我们将之整合，可以得到一个整体的解决方案和其解决流程。

其整体流程可以简述如下：

1. 采用 git 进行代码版本管理，并进行补丁版本迁移，得到应用于新版本的补丁后代码版本。
2. 根据得到的三个版本代码，分别采用 ASTro 分析其程序间差异性，生成对应的程序变更集合。



3. 根据得到的程序变更集合，采用 jpf-regression 进行不同版本间的变更影响分析，生成程序影响集合。
4. 对得到的影响范围求交集以计算是否重叠，若不重叠，则说明兼容。若存在重叠的影响范围，进一步采用人工分析，确认是否确实不兼容。

【此时可给出一张具体的流程图】

## 第4章 方法实现

本章中将主要介绍如何将补丁版本迁移、语义影响范围分析、兼容性分析等过程具体实现之，并组合成整体流程。

### 4.1 补丁版本迁移

如前所述，补丁版本迁移主要用于解决问题3.1。我们在实现该过程时，主要采用了 git 工具和 Beyond Compare 工具来实现版本合并和冲突解决的过程。

我们下面将利用 git 的分支功能进行版本合并。首先介绍一些前提假设：

1. 假设 git 的工作目录如图所示。
2. 假设补丁  $p_1$  为 old.patch 文件，并且采用 git diff 或其他 Unix diff 命令生成。

下面将具体介绍整个版本合并的过程。

首先在工作目录下将 git 切换到主分支 master。然后在主分支 master 中提交代码版本  $v_1$ 。

```
1 git checkout master
2 git add .
3 git commit -a -m "old_version_committed"
```

然后新建并切换到分支 new 中，并提交代码版本  $v_2$ 。

```
1 git checkout -b new
2 git add .
3 git commit -a -m "new_version_committed"
```

再次新建并切换到分支 patched\_old，然后将补丁  $p_1$  应用到版本  $v_1$ ，获得旧版本应用补丁后的代码，其版本为  $v_3$ ，并提交代码版本  $v_3$ 。此时我们所应用的补丁  $p_1$  是专为版本  $v_1$  设计，所以应用时不会出现问题。

```
1 git checkout -b patch
2 git apply ../patch/old.patch
3 git add .
4 git commit -a -m "patched_version_from_old_version_committed"
```

然后再切换回分支 new，将分支 patch 合并入分支 new，获得新版本应用补丁后的代码，其版本为  $v_4$ ，并使用 Beyond Compare 工具解决可能出现的冲突问题。将冲突解决完毕后，再提交版本  $v_4$ 。

```
1 git checkout new
2 git merge patch
3 git mergetool
```

```
4 git commit -a -m "patched_version_from_new_version_committed"
```

如果确实有冲突，那么 Beyond Compare 工具会展开一个 GUI，并给出冲突位置的提示，方便进行人工选择、合并。

## 4.2 语义影响范围分析

### 4.2.1 程序间差异分析

### 4.2.2 变更影响分析

## 4.3 兼容性分析

## 第 5 章 兼容性分析算法

介绍具体的兼容性算法，如果两个影响集合存在交集，是否确实是不兼容的。

## 第 6 章 实验

以 Eclipse jdt core 为例，进行实验，并分析得到的实验结果。

### 6.1 补丁版本迁移

### 6.2 语义影响范围分析

#### 6.2.1 程序间差异性分析

#### 6.2.2 变更影响分析

### 6.3 兼容性分析

### 6.4 结论

## 第 7 章 结论

### 7.1 工作总结

### 7.2 未来工作

## 参考文献

## 致 谢

感谢贺飞老师对我的悉心指导，他的言传身教令我受益匪浅，并在我完成毕设工作时给出了许多有用的意见。

最后要感谢 ThuThesis，帮助我完成了本文的写作。



## 声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_