

异常信息敏感的框架 API 生命周期模型构造

燕季薇¹⁾ 黄进豪^{1),2)} 杨恒钦^{3),4),5)} 严俊^{1),4),5)}

¹⁾(中国科学院软件研究所 软件工程技术研究开发中心 北京 100190)

²⁾(北京工业大学 信息学部 北京 100124)

³⁾(国科大 杭州高等研究院 杭州 310024)

⁴⁾(中国科学院软件研究所 基础软件与系统重点实验室 北京 100190)

⁵⁾(中国科学院软件研究所 计算机科学国家重点实验室 北京 100190)

摘要 大型软件系统的实现依赖于底层框架或第三方库，但这些复杂的框架/库代码在演化升级时往往独立于其调用者，为上层软件的质量保障带来挑战。例如，框架/库代码演化时新增和删除 API、更改 API 的代码语义等行为会导致框架/库代码的不同版本之间不兼容，进而导致上层应用开发者更新版本时，影响应用代码的正确性。为应对这一问题，需精准提取框架/库代码 API 的演化过程，形成演化报告，协助上层应用开发者选择兼容的版本或快速进行代码适配。其中，框架/库代码 API 的演化过程分析对应着框架 API 生命周期模型构造。现有工作中的 API 生命周期模型主要关注 API 的存在性变动，而未考虑特定代码语义变更对开发者的影响，特别是异常相关代码带来的语义变更，给上层软件系统带来隐患。为此，本文采用面向 Java 字节码的静态分析方法，识别框架 API 中的异常抛出行为并为其生成异常摘要报告，通过多轮流式匹配策略获取异常信息的变更情况，最终为框架/库代码构造异常信息敏感的 API 生命周期模型。该方法：1) 通过控制依赖语句切片提取异常抛出语句的关键触发条件，采用参数推断策略将局部变量的约束条件转换为仅与外部输入参数相关的异常前断言，并基于自底向上的摘要传递实现跨过程异常摘要提取；2) 通过关键信息精准匹配和自适应模糊匹配策略，分析异常摘要信息的新增、删除和修改情况，最终得到异常敏感的 API 生命周期模型（共涉及七种 API 变更形式）。基于该方法，实现了基于 Java 字节码分析的 API 生命周期提取工具 JavaExP。与现有最新方法相比，JavaExP 的异常摘要信息提取准确性（F1 值）提高了 67%，分析用时降低了 87%。对真实项目的 API 生命周期演化分析表明，与异常不敏感的 API 生命周期模型相比，采用异常敏感的模型时，API 发生变动的比例提高了 18%。在 75,433 个被分析的 API 中，约有 20% API 的异常抛出行为至少发生过一次改变，这些 API 共涉及超过七千多处独立的异常变更。在多个项目上的分析结果表明，异常敏感的模型构造能够更加精准地描述 API 的演化过程。

关键词 静态分析；代码演化；Java 异常摘要；API 生命周期

中图法分类号 TP311

Exception-aware Lifecycle-model Construction for Framework APIs

YAN Ji-Wei¹⁾ HUANG Jin-Hao^{1),2)} Yang Heng-Qin^{3),4),5)} YAN Jun^{1),4),5)}

¹⁾(Technology Center of Software Engineering, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

²⁾(Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing, 100124)

³⁾(Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou, 310024)

⁴⁾(Key Laboratory of System Software, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

⁵⁾(State Key Laboratory of Computer Science, Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

收稿日期：2024-01-02；在线发布日期：2024-06-19。本课题得到国家自然科学基金青年基金（No. 62102405）、国家自然科学基金重点项目（No. 62132020）和中国科学院软件研究所创新基金重大重点项目（ISCAS-ZD-202302）资助。燕季薇，博士，助理研究员，计算机学会会员，主要研究领域为程序分析与软件测试，E-mail: yanjiwei@otcaix.iscas.ac.cn。黄进豪，本科，主要研究领域为程序分析，E-mail: jinhao.huang@outlook.com。杨恒钦，硕士研究生，主要研究领域为移动应用分析，E-mail: yanghengqin19@mails.ucas.ac.cn。严俊（通信作者），博士，研究员，计算机学会会员，主要研究领域为程序分析与软件测试，E-mail: yanjun@otcaix.iscas.ac.cn。论文对应的开源工具：JavaExP. <https://github.com/hanada31/JavaExP> 第1

作者手机号码 13261537532

Abstract The implementation of large-scale software systems usually depends on low-level frameworks, or third-party libraries. However, the evolution of these frameworks or libraries is independent of the upper-level applications, which brings challenges in upper-level code quality assurance. For instance, changes in framework/library code, such as adding or removing APIs and altering API semantics, may result in inconsistencies among different versions of the framework/library code. These inconsistencies can impact the quality of higher-level apps when developers update frameworks/libraries. To address this issue, analyzing the evolution process of framework/library code APIs is essential. This analysis helps upper-level app developers swiftly choose compatible versions or adjust their code. In this context, analyzing the evolution process corresponds to constructing a framework API lifecycle model. Nowadays, existing works propose the API existence-changing model for defect detection, while not considering the influence of semantic changes in APIs, especially exception-related code evolution. To fill this gap, this paper adopts static analysis techniques to extract exception summary information in the framework API code, proposes a multi-step matching strategy to obtain the changing process of exceptions, and finally generates exception-aware API lifecycle models for the given framework/library project. Our approach: 1) adopts control-dependency slicing analysis to extract the conditions of the exception-thrown statements; uses a parameter tracing strategy to transform exception-throwing conditions into external-variable-related preconditions; and performs inter-procedure precondition construction by a bottom-up summary-based analysis. 2) proposes the exact-matching and adaptive-matching strategies to analyze the framework/library code changes including additions, deletions and modifications of APIs; generates exception-aware API lifecycle models which cover seven API changing types. With this approach, the API lifecycle extraction tool, JavaExP, is implemented, which is based on Java bytecode analysis. Compared to the state-of-the-art tool, the F1 score of exception summary information extracted by JavaExP has increased by 67%, with a reduction in processing time by 87%. The evaluation of real-world projects shows that, compared to the exception-unaware API lifecycle modeling, JavaExP can identify 18% times more API changes. Among the 75,433 APIs under analysis, 20% of APIs have changed their exception-throwing behavior at least once after API introduction. These APIs involve a total of more than 7K independent exception changes. The overall results show that the exception-aware lifecycle modeling can describe the evolution process of APIs more accurately.

Key words static analysis; program evolution; Java exception summary; API lifecycle

1. 引言

大型软件系统往往由多个模块组成，其代码实现依赖于底层编程框架和种类繁多的第三方库。这些框架/库代码通过持续的版本更新修改代码缺陷或完善代码功能，其演化过程独立于调用它们的上层软件系统。在上层应用的不断开发过程中，为了使用新版本库代码中的功能模块，规避存在代码缺陷或存在安全隐患的库代码版本，开发者会按需对所调用的框架或库代码版本进行升级或降级，然而，如果上层应用开发者在不熟悉框架/库代码 API 演化过程的情况下变更版本，反而可能会引入新的问题，如使用了被移除的 API 或未及时捕获处理新版本代码中抛出的异常，进而导致程序崩溃或引发兼容性问题等。框架/库代码中 API 的变更行为导致

用户在迁移上层软件系统时花费较多精力，间接增加了使用特定框架/库的开发难度^[1-3]。为保障这些依赖于底层框架/库函数的软件系统质量，需精准分析框架/库代码 API 的演化过程，形成演化报告，协助上层应用开发者选择兼容的版本或快速进行代码适配。这里，框架/库代码 API 的演化过程的分析对应着框架 API 生命周期模型构造。

目前，相关研究工作^[4-6]中提出了 API 级别的生命周期模型^[7]，并通过分析框架更新时提供的 API 变更文本文件^[4]或通过轻量级框架代码分析扫描其 API 列表^[5,6]等方法来构建 API 级别的生命周期模型，基于该生命周期，开发者可以检测调用特定版本中不存在的 API 函数造成的兼容性问题。除了 API 的存在性变更（即 API 引入和删除行为），API 中关键代码语义变更也会影响 API 的调用规约，对上层代码质量产生很大的影响。因此，对于

框架/库的调用者，除了 API 的存在性变更外，API 中的关键语义变更也是构造框架/库 API 生命周期模型时需要考虑的一项关键信息。

调研发现，虽然 API 的语义变更数量众多，但并非所有的 API 行为变更都会对用户的使用产生影响。在 API 演化过程中，同一 API 的基本功能往往保持一致，但与输入输出相关的操作变更，如对外部输入数据的校验方式变更，会对 API 的上层调用产生较大的影响。在 Java 代码中，当 API 接收到非预期的外部输入时，通常会抛出异常来应对发生的非预期行为，而上层用户需要及时捕获并处理这些抛出的异常。异常抛出代码相关的语义变更对于代码质量保障至关重要。Mostafa 等人对 Java 库代码兼容性错误的统计表明，由异常导致的兼容性问题占比超过 1/3 (102/296)^[8]。葛等人在文献^[9]中指出，框架/库代码中存在的错误或漏洞可能会被攻击者利用，从而损害软件供应链安全，这些错误或漏洞往往与框架/库代码中存在的异常有关。经调研，异常语义变化对上层应用产生影响的典型场景包括，新增或修改异常导致上层异常未捕获缺陷(CWE-248)^①，删除异常导致不必要的异常捕获缺陷(CWE-395)^②，新增或变更异常导致的通用异常捕获声明缺陷(CWE-396)^③等。这一现象表明，异常抛出部分的代码实现与上层应用代码质量息息相关，提取代码演化过程中异常抛出行为信息并获取其变更方式对软件维护具有重要意义。

```
1. public int getCount() {
2. -   return (int) getByteCount();
3. +   long result = getByteCount();
4. +   if (result > Integer.MAX_VALUE) {
5. +     throw new ArithmeticException("The byte count
" + result + " is too large to be converted to an int"); }
6. +   return (int) result; //修改返回空值为抛出异常
7. }
```

(a) 新增异常实例

```
1. public static void moveFile(File srcFile, File destFile)
throws IOException {
2.   if (destFile.exists())
3. -   throw new IOException("Destination " + destFile +
```

^① CWE-248: Uncaught Exception.
<https://cwe.mitre.org/data/definitions/248.html>

^② CWE-395: Use of NullPointerException Catch to Detect NULL Pointer Dereference. <https://cwe.mitre.org/data/definitions/395.html>

^③ CWE-396: Declaration of catch for generic exception.
<https://cwe.mitre.org/data/definitions/396.html>

```
  " already exists");
4. +   throw new FileExistsException("Destination " +
destFile + " already exists"); //修改异常类型
5. }
```

(b) 修改抛出异常类型

```
1. public void forceDelete(File file) throws IOException {
2. +   boolean filePresent = file.exists();
3. +   if (!file.delete()) { //增加文件删除判断条件
4. +     if (!filePresent) {
5. -     if (!file.exists()) {
6.       throw new FileNotFoundException("File does
not exist: " + file); }
7. +   }
8. }
```

(c) 修改异常抛出条件

图 1 不同版本 API 中异常相关代码变更示例

图 1 给出了真实项目中的异常相关变更代码片段示例，包括新增^①或删除^②异常实例、修改异常实例的类型^③、描述^④或抛出条件^⑤等。可以看到，真实代码中异常的变更形式多种多样，如果开发者在不清楚框架/库中的代码变更情况时随意更新版本，会给上层软件系统带来隐患。此外，在代码演化过程中，同一异常可能发生多次不同类型的变更^⑥（如图 2），使得情况变的更加复杂。如果开发者可以预先获取底层框架或第三方库的异常信息演化报告，则可以在变更库代码版本时，根据库代码的变更行为同步地修正上层应用代码的调用方式，避免在库代码升级时引入的兼容性问题或其他安全隐患。为了便于开发者更好地理解框架/库代码调用规约，快速选择兼容的版本或快速进行代码适配，本文在 API 存在性变更识别的基础上，通过静态程序分析技术检测 API 中异常行为变更，从而构造**异常信息敏感的生命周期模型**。

为构造“异常信息敏感”的生命周期模型，需对异常摘要信息进行准确提取，并分析异常在不同版本中的变更情况。由于现有的基于静态分析和学

^① 异常新增。
<https://github.com/apache/commons-io/commit/e03d721>

^② 异常删除。
https://github.com/aosp-mirror/platform_frameworks_base/commit/8b73d86

^③ 类型修改。
<https://github.com/apache/commons-io/commit/af9bf28>

^④ 抛出条件修改。
<https://github.com/apache/commons-io/commit/50f9c93>

^⑤ 描述文本修改。
<https://github.com/apache/commons-io/commit/8814b6d>

^⑥ 位置变更。
<https://github.com/apache/commons-io/commit/2d37ab6>

习的方法缺失对异常行为的细粒度建模和针对异常行为摘要的精确匹配策略，本文面临的关键挑战是：①如何构建能够准确表征异常行为且便于异常演化分析的摘要信息报告；②如何精准地在多版本中匹配变更的异常实例并识别变更内容。

针对这些挑战，本文设计了一种面向演化分析的异常摘要形式，它包含异常类型、描述文本、前断言（pre-condition）等核心信息。为了减少匹配时的数据噪音，方法在异常抛出条件分析时，通过控制依赖约束分析去除与异常抛出无关的条件约束；通过数据流分析将所有中间局部变量约束转换为外部输入变量约束；通过跨过程异常传递分析避免函数级代码重构导致的函数内异常变更。此外，为准确识别不同版本代码中的异常实例，本文设计了基于类型、描述、前断言、关键前断言四类信息的过滤器，对无法完全匹配的异常实例采用多轮流式匹配策略识别变更实例、分析变更过程，最终生成涵盖七类变更行为的异常敏感 API 生命周期报告。

基于该方法，本文实现了异常信息敏感的 Java API 分析工具 JavaExP（Java Exception-aware API analyzer^①）。多组对比实验验证了本文方法的有效性。对于异常摘要提取模块，与最新的 Java 异常分析工具 WIT^[10] 相比，JavaExP 使用更短的时间（-87%）提取到了大量 WIT 无法分析的异常信息，并显著提高 F1 分数（相对提升 67%）。应用 JavaExP 分析了六个项目的 60 个版本，并为其生成 API 生命周期报告，演化分析的准确率达到 98%；找到了 API 中大量的异常变更行为，在 75,433 个 API 中，在异常敏感的 API 生命周期模型中，约 20% 的 API 在首次引入后，异常信息发生过至少一次变动；与异常不敏感的 API 生命周期相比，异常敏感的 API 发生变动的比例提高了 18%。

本文的主要贡献为：

- 设计了一种面向演化分析的异常摘要形式，该摘要能够减少匹配时的数据噪音，并采用静态分析方法准确提取摘要中各要素的信息。
- 设计了基于类型、描述、前断言、关键前断言四类信息的异常匹配过滤器，以及基于多轮流式匹配策略的异常匹配方法。
- 根据提出的方法，实现了工具 JavaExP。该工具能够准确、高效的为 Java 真实项目生成异常敏感的生命周期报告，其代码和实验数据均已开源。

本文的章节结构设计如下：第 1 章为引言；第 2 章介绍本文所需的基础知识和概念定义；第 3 章给出方法概览；第 4、5 章分别介绍面向 Java 程序的异常摘要提取方法和基于异常摘要分析 API 生命周期构造两个模块；第 6 章给出实验设计和结果分析，评估所提方法的有效性；第 7 章介绍本文的相关工作；最后一章为总结与展望。

2. 基础知识与示例应用

2.1. Java 异常

异常是在程序执行过程中出现的问题或错误的一种表示。在 Java 语言中，异常被定义为派生自 java.lang.Exception 类的对象，在 Java 类库、用户方法及运行时故障中都可能会抛出异常。Java 提供了很多内置的异常类，如 IOException、IllegalArgumentException 等，此外，开发人员还可以自定义异常类以便适应特定需求。一部分异常会被 Java 虚拟机自动地抛出，在运行时不需要显式处理，但它们可能会导致程序的异常终止，这类异常也被称为非受检异常或运行时异常；另一类异常需在编译时显式地处理，否则会导致编译错误，它们又叫受检异常或编译时异常^[11,12]。当检测到不符合预期条件或无法处理的情况时，开发者可以通过 throw 语句声明主动抛出异常提供有关特定问题或错误的信息，并将控制权交给调用者或上层代码来处理（try-catch 行为）。对于框架/库 API 的调用者，API 中抛出的异常类型、抛出条件等与 API 调用过程中的数据输入规约和异常捕获方式息息相关。因此，这类变更应被及时传递给开发人员。

2.2. API 演化和生命周期

应用程序接口（API）是框架/库代码对外提供的服务的调用接口。随着代码功能的演化升级，旧版本 API 在新版中可能被删除，新版代码中也会增加 API 以提供更丰富的功能。除了 API 的增加与删除，API 中代码的实现方式、数据校验方式等均可能发生改变。API 的生命周期指 API 在不同的框架/库版本中的存在范围，如 Li 等人提取了安卓框架代码中 API 的生命周期模型^[4]，该模型反映出 API 本身的频繁变动。此外，在持续存在的 API 中，其包含的异常实例也可能是持续演化的，这类变化在异常不敏感的 API 级别生命周期模型中无法体现。

^① JavaExP. <https://github.com/hanada31/JavaExP>

2.3. 概念定义

针对 API、异常及生命周期等概念，我们分别给出如下定义。

定义 1(应用程序接口方法): API = (id, version, class, method, S_Ex) 为一个应用程序接口方法，它包含 API 的签名、版本号、所在的类名称、方法名称以及包含的异常集合 S_Ex。

定义 2 (异常摘要): Summay(exp) = (API.id, type, message, condition, precondition), exp ∈ API.S_Ex 为一个异常摘要，它包含异常所在的 API、异常的类型、异常抛出时的描述文本信息、异常抛出语句的控制依赖条件以及与异常抛出相关的外部参数前断言。

定义 3 (API/异常存在性生命周期) API 的存在性生命周期为该 API 从引入到删除的版本区间的并集。对于其中包含的异常实例 exp ∈ S_Ex，异常的存在性生命周期为该异常在该 API 中从引入到删除的版本区间的并集。

定义 4 (异常敏感的 API 生命周期) API 中所有异常对象 exp ∈ API.S_Ex 摘要信息 Summay(exp) 的集合为 S_Summary(S_Ex)，在不同的版本中，当且仅当两个异常摘要信息集合中任何异常摘要信息均相同时，可认为异常摘要信息的取值在不同版本上保持不变。对于异常摘要信息集合的特定取值，如果其出现的最早版本为 V_i，最末版本为 V_j (i <= j)，则其生命周期为 [V_i, V_j]。对于异常敏感的 API 生命周期，它给出了摘要信息集合 S_Summary 在目标版本中所有不同取值到其生命周期的映射关系。导致 API 中异常摘要信息取值变更的操作被称为异常敏感的 API 操作，包括：API 新增、API 删除、API 修改-异常新增、API 修改-异常删除、API 修改-异常类型变更、API 修改-异常描述变更和 API 修改-异常断言变更七类。

2.4. 示例代码

图 2 为开源项目 Apache Commons IO^①中 API moveFile() 的代码片段，给出了其异常 e 在不同版本中的变更情况，+表示新增代码，-表示删除代码。该异常为针对 API 第 2 个参数变量 destFile 的文件存在性校验。在版本号 1.4 的代码中，类型为 IOException 的异常实例 e 被引入，而在 2.0 版本中，异常实例 e 的类型被更改为 FileExistsException 类。随后，在版本 2.7 中，该方法被重构，但实际异常

e 的抛出条件未发生变化。在版本 2.9 中，该方法被再次重构，异常 e 的抛出位置发生变化，其描述文本和异常前断言也发生改变。因此，对于异常 e，其演化过程为一次新增，一次异常类型更改，一次异常描述文本和前断言更改，期间还经历了两次方法重构。在这种情况下，上层开发者很难通过查看代码快速判断不同版本中 API 包含的异常是否变动，更难以提取变动的过程。为自动化提取目标 API 的生命周期，需准确获取每个异常实例的关键信息，判定不同版本中的多个异常摘要信息是否指向同一个异常实例，对同一实例记录其变更过程，在此基础上，构建完整准确的 API 生命周期报告。

```

1. public static void moveFile(File srcFile, File destFile) ...{
2.     if (srcFile == null) {
3.         throw new NullPointerException("Source must not
be null");
4.     if (destFile == null) {
5.         throw new NullPointerException("Destination
must not be null");
6.     if (!srcFile.exists()) {
7.         throw new FileNotFoundException("Source '" +
srcFile + "' does not exist");
8.     if (srcFile.isDirectory()) {
9.         throw new IOException("Source '" + srcFile + "' is
a directory");
10.    if (destFile.exists())
11. -   throw new IOException("Destination '" +
destFile + "' already exists"); //V1.4 中引入
12. +   throw new FileExistsException("Destination '" +
+ destFile + "' already exists"); //V2.0 中变更类型
13. }
```

(a) 版本变更 V1.4 → V2.0

```

1. public static void moveFile(File srcFile, File destFile) ...{
2. + validateMoveParameters(srcFile, destFile);    if
(srcFile.isDirectory()) {
3.     throw new IOException("Source '" + srcFile + "' is
a directory");
4.     if (destFile.exists())
5.         throw new FileExistsException("Destination '" +
+ destFile + "' already exists"); //V2.7 中局部代码重构
6. }
```

(b) 版本变更 V2.0 → V2.7

^① Apache Commons IO. <https://github.com/apache/commons-io>

```

1. public static void moveFile(File srcFile, File destFile) ...{
2. - validateMoveParameters(srcFile, destFile); - if
  (srcFile.isDirectory()) {
3. -     throw new IOException("Source '" + srcFile + "'"
  is a directory");
4. - if (destFile.exists())
5. -     throw new FileExistsException("Destination '" +
  destFile + "' already exists");
6. + moveFile(srcFile, destFile,
  StandardCopyOption.COPY_ATTRIBUTES);
7. }
8.
9. + public static void moveFile(File srcFile, File destFile,
  CopyOption... copyOptions) throws IOException {
10. + validateMoveParameters(srcFile, destFile);
11. + requireFile(srcFile, "srcFile");
12. + requireAbsent(destFile, null);
13.
14. + private static File requireFile(File file, String name) {
15. +     Objects.requireNonNull(file, name);
16. +     if (!file.isFile()){
17. +         throw new IllegalArgumentException
  ("Parameter '" + name + "' is not a file: " + file); }
18. +     return file;
19. + }
20.
21. + private static void requireAbsent(File file, String
  name) throws FileExistsException {
22. +     if (file.exists())
23. +         throw new FileExistsException(String.format
  ("File element in parameter '%s' already exists: '%s'",
  name, file)); //V2.9 中整体代码重构
24. +}

```

(c) 版本变更 V2.7 → V2.9

图 2 Apache Commons IO 异常变更示例代码

3. 方法概述

本文异常信息敏感的 Java API 生命周期提取方法 (JavaExP 工具) 框架图如图 3 所示。JavaExP 以多个版本的 Java 项目的 jar 包或 class 文件作为输入，先通过异常摘要提取模块获取每个版本的异常摘要报告；然后，这些摘要报告被传入到生命周期

构造模块，通过对不同版本中 API 异常语义实例执行自适应匹配并对匹配成功的异常变更分析，来获取 API 的新增、删除情况和 API 中异常的新增、删除和修改情况，从而得到目标版本区间上异常信息敏感的 API 生命周期模型。后两章将分别对异常摘要提取和生命周期构造两个模块的分析方法进行介绍。

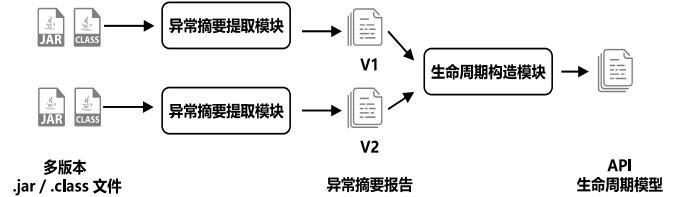


图 3 JavaExP 方法整体框架图

4. Java 程序异常摘要提取方法

本章介绍异常摘要提取模块的主要方法。

4.1. 异常摘要提取模块概览

JavaExP 的异常摘要提取模块主要包含基本信息分析和异常前断言分析两个部分，如图 4 所示。基本信息分析部分以 jar 包或 class 文件为输入，负责构建程序的控制流图、函数调用图等数据结构，并提取每个方法中抛出异常的基本信息，获得方法到异常的映射。异常前断言分析部分首先通过构建方法的控制依赖图，去除判定结果与异常抛出行为无关的非控制依赖条件，提高了断言分析结果的精准性。获取依赖条件后，再通过参数约束推断将异常触发条件关联到外部输入参数，获取单个方法的前断言。此外，通过函数调用关系和参数传递关系追踪进一步构造了跨过程的异常抛出前断言。最后，形成异常摘要报告。

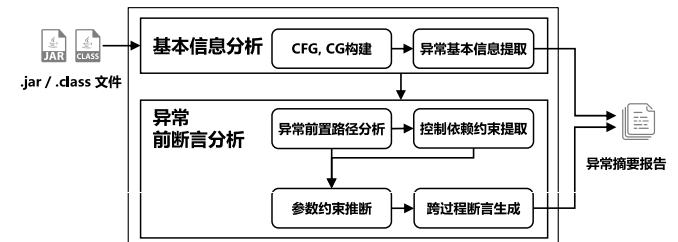


图 4 Java 程序异常摘要提取模块流程图

4.2. 基本信息分析

基本信息提取部分基于静态分析框架 Soot^①对

^① Soot. <https://github.com/soot-oss/soot>

输入代码进行预处理，为每个程序方法构建控制流图（Control Flow Graph, CFG），并生成全局的函数调用图（Call Graph, CG）。接着，通过遍历所有的语句，可以定位到显式抛出异常的 `throw()` 语句（称为异常抛出点），分析在每个异常抛出点抛出的异常类型和描述文本等异常基本信息。对于异常类型，根据异常变量的定义语句分析对应实例的类型；对于描述分析，从异常抛出点开始反向追踪，通过字符串函数建模还原完整的描述文本字符串，考虑到部分变量取值无法直接获取，这里将异常拼接后的文本信息转换为正则表达式形式。

获取基本信息后，JavaExP 记录方法名称和方法中显示抛出异常的映射关系，并生成方法-异常映射表，其中一个方法可以对应多个异常。对于图 2(c) 的示例应用，可以得到一条映射边 {`requireAbsent()` → `FileExistsException @loc23`}。由于方法 `moveFile` 的参数会影响 `requireAbsent` 的异常抛出，因此对 `moveFile` 也应生成异常前断言。在后续分析中，该断言可通过为 `requireAbsent` 方法构建异常行为摘要和追踪跨过程参数关系得到。

4.3. 前断言分析

除了基本信息，前断言信息也是异常摘要的重要组成部分。异常前断言表示异常被触发时应满足的前提条件，上层应用开发者在调用 API 时，如输入的参数满足前断言规约，会触发底层代码抛出异常，上层需采取相应的异常捕获措施，它的变更会对应用层代码的正确性造成影响。本节将介绍前断言信息的提取方法，包括控制依赖条件分析、外部输入参数约束推断和跨过程参数约束推断三部分。

4.3.1. 控制依赖条件分析

为了生成异常的前断言，需要准确提取异常的控制依赖条件。该条件位于异常触发的前置路径上，即在异常被触发时经过的程序路径上。路径信息可以从异常抛出点通过后向路径遍历得到，其上的全部条件被称为异常触发的前置路径条件。

定义 5（异常前置路径）： $\text{PrePath } (\text{m}, \text{e}) = (\text{S}_0, \dots, \text{S}_i, \text{S}_{i+1}, \dots, \text{S}_e)$ 为异常触发的一条前置路径，其中 S_0 为方法 m 的入口语句， S_e 为异常 e 的抛出语句，程序语句 S_{i+1} 是语句 S_i 的一个后继节点。异常 e 对应的多个异常前置路径形成了异常前置路径集合 $\text{PrePathSet}(\text{m}, \text{e})$ 。

定义 6（异常前置路径条件）： $\text{CondInPath } (\text{m}, \text{e}, \text{prePath})$ 为异常前置路径上的条件语句的集合，

每个元素 $\text{cond} \in \text{CondInPath}$ 且 $\text{cond} \in \text{CondInPath}$ 均是一个条件语句。

对于图 2(a)中的 `moveFile()` 方法，第 2-9 行分别抛出四个异常，如果他们的异常条件被满足，第 12 行异常 e 不会被抛出，因此，异常 e 依赖于这些控制条件。但如果将 2-9 行中的 `throw` 语句更改为非终止语句，如输出、日志、数据处理等语句，则其所属的条件将与第 12 行的异常无关。这类与异常抛出无关的路径前置条件语句无需被作为最终异常断言的一部分。

定义 7（异常控制依赖条件）： $\text{ControlCondInPath } (\text{m}, \text{e}, \text{prePath})$ 为异常前置路径上控制依赖条件的集合，其中每个元素 $\text{controlCond} \in \text{ControlCondInPath}$ 是一条和异常 e 之间存在控制依赖关系的条件语句，即对于条件 controlCond 在 CFG 上的多个后继节点，存在至少一个后继节点不存在于异常 e 的任何异常前置路径中。该条件语句所在的节点为异常抛出语句的一个控制依赖节点。

定义 8（异常控制依赖约束）： $\text{ControlConstraintInPath } (\text{m}, \text{e}, \text{prePath})$ 为异常前置路径上的异常控制依赖约束集合，每个异常控制依赖约束 $(\text{controlCond}, \text{isCondTrue}) \in \text{ControlConstraintInPath}$ $(\text{controlCond}, \text{isCondTrue}) \in \text{ControlConstraintInPath}$ 包括一个控制依赖条件语句及其条件判定结果。

算法 1 (`extractConstraint`) 给出了异常控制依赖约束的提取算法：给定方法 m 和方法中的异常 e (e 对应的异常抛出语句为 S_e)，该算法将计算异常 e 的控制依赖约束集合 $\text{controlConstraintSet}$ 。在第 2 行，该方法首先获取方法 m 的控制流图 cfg ，其中节点代表语句，边代表语句之间的控制流向关系。第 3 行提取控制依赖图 $\text{cdg}^{[12,13]}$ ，其中节点代表语句，边代表语句之间的控制依赖关系。通过搜索 cdg ，可以得到异常抛出语句 S_e 对应的异常控制依赖约束集合 $\text{controlConstraintSet}$ 。接着，第 5 行通过在 cfg 上后向路径遍历得到异常前置路径集合 prePathSet 。对于 prePathSet 中的每条异常前置路径 prePath ，第 7-13 行负责构建仅包含异常控制依赖条件切片的集合 $\text{controlConstraintInPath}$ ，并在第 14 行将其加入输出集合 $\text{controlConstraintSet}$ 中。在这一过程中，第 8 行遍历 prePath 中的每一个节点，如果一个节点是条件语句，且存在于 S_e 的控制依赖

节点集合 controlNodeSet 中，第 9 行将记录该节点 node。第 10 行分析 node 在 prePath 上的后继节点 node.succ，判定当前路径上 if 条件的判定结果为 true 或为 false（在字节码中，if 语句会指明当 if 条件为真时的 goto 语句的位置，因此，可通过下一语句 succ 是否为 goto 的目标语句判定条件是否取值为真）。随后在第 11 行，该节点 node 与条件判定结果 isCondTrue 形成的约束条件 constraint 会被加入当前路径的异常控制依赖约束集合 controlConstraintInPath 中。最后，第 16 行将返回方法 m 的异常控制依赖约束集合 controlConstraintSet，其中每个元素为一条路径上的一组控制依赖约束。

算法 1 控制依赖约束分析 extractConstraint

输入：方法 m，异常 e（异常抛出语句为 S_e ）

输出：异常控制依赖约束集合 controlConstraintSet

```

1 Set <Set<Constraint>> controlConstraintSet = new
  HashSet(); //初始化
2 Graph cfg = constructCFG (m); //构建控制流图 cfg
3 Graph cdg = constructCDG (cfg, m); //构建控制依赖图
  cdg
4 Set <Node> controlNodeSet= getControlNodesOfExp
  (cdg,  $S_e$ ); //在 cdg 中找到  $S_e$  的控制依赖节点
5 Set <Path> prePathSet = backTraverseFromExp (cfg,  $S_e$ );
//从  $S_e$  后向路径遍历得到异常前置路径
6 FOR (Path prePath : prePathSet){
7   Set <Constraint> controlConstraintInPath= new
  HashSet();
8   FOR (node : prePath) {
9     IF (node.isCondition () and controlNodeSet.contains
  (node)) {
10       Boolean isCondTrue =getCondJudgeRes (node,
  node.succ); //获取分支条件的判定结果
11       controlConstraintInPath.add (new Constraint
  (node, isCondTrue)); //新增控制依赖条件
12     }
13   }
14   controlConstraintSet.add (controlConstraintInPath)
//增加一条路径上的一组控制依赖条件
15 }
16 Return controlConstraintSet

```

以图 2(a)中 moveFile()方法的异常控制依赖约束的提取为例。首先需要分析异常的控制依赖节点，由于其代码第 2、4、6、8、10 行中的 5 个控制条件均存在一个后继节点不在任何一条异常前置路径中，可得到 controlNodeSet={2,4,6,8,10}，从而得到对应的控制依赖条件。接着，通过分析异常控制依赖条件在异常前置路径中的后继语句，即条件为真或为假时的后继语句在异常前置路径中，可以得到每个异常控制依赖条件取值结果，即 controlConstraintInPath = {(srcFile == null, false), (destFile == null, false), (srcFile.exists(), true), (srcFile.isDirectory(), false), (destFile.exists(), true)}。这里仅为方便展示，在实际的字节码分析过程中，可被获取的是中间变量约束，如(\$z0==0, false)。

4.3.2. 外部输入参数约束推断

经过上一节的分析，可以获取异常的控制依赖约束。但字节码中没有变量名称信息，仅有按序编号的内部变量，如 r0, z1，而这些变量在不同版本中不存在关联关系，难以被直接用于匹配和比较。因此，应将约束的主体转换为语义固定的对象，如 API 的参数，提取异常前断言时通过数据流追踪获取的内部变量约束归约为参数相关约束，从而准确分析异常前断言的变更情况。

算法 2 参数约束推断分析 refineAnalysis

输入：方法 m，异常 e（异常抛出语句为 S_e ），异常控制依赖约束 controlConstraint

输出：推断后的约束条件 refinedConstraint

```

1 Set <Value> dataRelatedVars= getVarFromStmts
  (controlConstraint.getStmt()); //提取约束中的变量
2 FOR (Value: value dataRelatedVars){
3   IF (isOutsideValue(value)) continue;
4   Stmt assignStmt= getAssignStmtofValue
  (getDefUse(m), value); //基于 def-use 分析定位变量的
  赋值语句
5   refinedConstraint = replaceValueInConstraint
  (controlConstraint.getStmt (), value, assignStmt.
  getRightValue()) //将约束语句中的 value 替换为 value
  的赋值内容
6   refineAnalysis(m, e, refinedConstraint)
7 }
8 Return refinedConstraint

```

算法 2 (refineAnalysis) 给出了参数约束推断算法: 给定方法 m 和方法中的异常 e (e 对应的异常抛出语句为 S_e) 和 e 的一个异常控制依赖约束 $controlConstraint$, 该算法将通过参数推断得到仅与外部输入参数相关的约束 $refinedConstraint$ 。算法第 1 行提取约束中涉及的所有变量并将它们放入 $Value$ 集合 $dataRelatedVars$ 中。第 2~7 行对每个变量 $value$ 提取其外部参数约束, 其中第 3 行判断当前变量本身是否直接为外部输入变量, 如果是则跳过分析。对于变量集合中非输入参数相关的内部变量, 第 4 行根据数据流提取方法 m 中 $value$ 的定义-使用链 (def-use chain) 并得到 $value$ 的赋值语句。第 5 行根据数据分析结果更新原约束条件 $controlConstraint$, 即依次使用内部变量的赋值结果替换原变量, 并在第 6 行将更新后的约束 $refinedConstraint$ 递归地传入 $refineAnalysis()$ 方法继续分析, 直至 $refinedConstraint$ 中不再包含内部变量时, 迭代终止。该算法第 8 行将返回推断后的约束条件 $refinedConstraint$ 。输出时, JavaExP 通过启发式策略优化了输出形式, 增强了断言的可读性。对于图 2(c) 中的 $requireAbsent$ 方法, 经过数据流追踪, 得到该方法内的控制依赖条件为 $(\$z0==0, false)$ 。表 1(a) 中给出了通过数据流分析反向推断外部数据约束 $parameter0.exists()$ 的过程。

表 1(a) 过程内追踪约束条件 ($requireAbsent$)

控制依赖	数据流追踪后推断的约束条件
$(\$z0==0, false)$	$\$z0 \text{ is true} + \$z0 \text{ is-invoke } r0.exists()$
	$\rightarrow r0.exists() \text{ is true}$
	$r0.exists() \text{ is true} + r0 \text{ denote parameter0}$
	$\rightarrow parameter0.exists() \text{ is true}$

4.3.3. 跨过程参数约束推断

在 API 的演化过程中, 异常的抛出位置可能发生移动, 如将异常抛出语句移动到另一方法并调用它。如采用过程间分析, 这类代码重构会被识别为异常的删除, 从而引发 API 演化分析中的误报。如图 2 对应的异常实例, 在 V1.4 中, 异常抛出代码仅在 $moveFile()$ 本身中出现, 但在最新的 V2.13 中, 该异常需要至少联合分析 6 个函数的才能被准确获取。为了增加异常匹配分析的准确度, JavaExP 在为过程内所有异常实例构造摘要信息的基础上, 通过函数调用关系分析和参数映射关系分析, 生成跨过程的异常摘要信息。

跨过程参数约束推断的过程包含四步。首先,

构造应用程序的函数调用图, 并对函数调用关系进行拓扑排序。其次, 对函数调用图进行去环操作, 得到函数调用拓扑序, 确定逆拓扑序 (自底向上) 的分析顺序, 即被调用的方法 $callee$ 会比调用它的方法 $caller$ 更早被分析。接着, 依次分析每个方法, 过程为: 1) 对于当前方法 $caller$ 中的调用语句 $stmt$, 读取其被调用方法 $callee$ 的异常抛出摘要, 如果被调用方法 $callee$ 的参数与异常抛出有关, 则根据调用方法 $caller$ 和被调用方法 $callee$ 中参数位置的映射关系, 更新从被调用方法 $callee$ 中获取的参数相关约束 $cons_1$ 。2) 提取 $caller$ 方法中调用 $callee$ 语句前的程序路径上需要满足的参数相关约束, 包含路径上的控制依赖约束 $cons_2$ 和路径上被调用函数中的其他异常抛出约束的取反 $cons_3$ 。3) 对于函数内直接抛出的异常, 也应使用异常抛出前置路径的函数调用中使得异常不被抛出的约束 $cons_3$ 更新其直接约束。4) 约束 $cons_1, cons_2, cons_3$ 均更新到调用方法 $caller$ 的参数约束中后, 可得到关于方法 $caller$ 的异常前断言。最后, 按照逆拓扑的分析顺序, 依次更新每个方法的前断言信息, 由于底层约束会向上传递更新, 每个方法仅被分析一次。

对于图 2(c) 中的 $moveFile$ 方法, 其第 1 个参数对应方法 $requireAbsent$ 中的第 0 个参数, 根据这一参数映射关系可以更新 $requireAbsent$ 中的前断言信息得到 $moveFile$ 的约束。此外, 在 $moveFile$ 中调用 $requireAbsent$ 方法时, 执行到该方法调用点时应满足来自前置方法 $validateMoveParameters$ 和 $requireFile$ 中的其他约束, 最终得到由 5 个约束组成的完整前置条件。结果见表 1(b)。

表 1 (b) 跨过程追踪约束条件 ($moveFile$)

控制依赖	数据流追踪后推断的约束条件
constraint in <i>requireAbsent</i> + constraints in <i>moveFile</i>	$requireAbsent@parameter0.exists() \text{ is true} + requireAbsent(r1,null)$
	$\rightarrow r1.exists() \text{ is true}$
	$r1.exists() \text{ is true} + r1 \text{ denote parameter1}$
	$\rightarrow parameter1.exists() \text{ is true}$
	<i>merge constraints from related methods</i>
	$parameter0 \text{ is not null} + parameter1 \text{ is not null} + parameter0.exists() \text{ is true} + parameter0.isFile() \text{ is true} + parameter1.exists() \text{ is true}$

5. 基于异常提取的 API 生命周期构造

本章介绍 API 生命周期构造模块的主要方法。

5.1. API 生命周期构造模块概览

JavaExP 的生命周期构造模块主要包含 API 匹配与变更分析、生命周期模型构造两个部分。如图 5 所示，**异常匹配与变更分析部分**以异常摘要报告为输入，先采用完全匹配策略获取 API 异常实例的匹配关系，再通过自适应匹配策略识别其他异常实例的映射和局部变更情况，生成异常敏感的 API 变更报告；**生命周期模型构造部分**则以多个版本的 API 变更分析报告为输入，分析同一 API 方法或同一异常实例在不同版本中的变更过程，最后生成相应的生命周期模型。

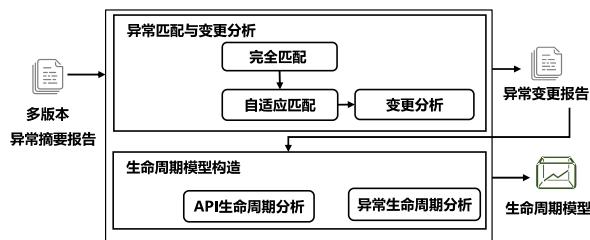


图 5 API 生命周期构造模块流程图

5.2. 异常信息敏感的 API 匹配与变更分析

基于提取的异常摘要信息，我们采用完全匹配和自适应匹配相结合的方式对不同版本中的异常进行匹配。在匹配过程，API 签名、异常类型、描述和断言信息是四个关键信息。这里仅考虑签名相同的 API 中异常的匹配，如果 API 签名变更，则认为不可匹配。

表 2 异常实例匹配规则

规则	API	异常摘要				匹配结果
		签名	类型	描述	断言	
R1	√	√	√	√	√	匹配-未变更
R2	√	X	√	√	√	匹配-类型变更
R3	√	√	X	√	√	匹配-描述变更
R4	√	√	√	√	X	匹配-断言变更
R5	√	√	X	X	X	可能匹配-断言和描述变更
R6	√	X	√	√	X	不匹配
R7	√	X	X	√	√	不匹配
R8	√	X	X	X	X	不匹配

如表 2 所示，异常类型、描述和断言信息的不

同组合共有 8 种。如果两个异常符合规则 R1，则认为它们可完全匹配，该异常未发生改变。如不能完全匹配，则需根据规则 R2-R8 进行自适应匹配。在这些规则中，我们将根据对符合该类别特征代码实例的经验分析和意图理解，判定不同变更特征下的异常代码是否可匹配。对于 R2-R4，仅有单一信息变更，这类变化更有可能是同一异常的正常演化导致的，而非两个高度相似的异常。而如果多个信息变更，其匹配情况将相对复杂，如果两个异常摘要中有至少两类信息不一致 (R5-R8)，通常可认定两个异常指向不同的实例。但考虑到异常类型这一信息指向性较为稳定，在代码重构中有可能出现类型不变但是异常描述和断言发生改变的情况，因此规则 R5 下的匹配结果将视情况而定，具体参见以下异常匹配的详细流程。

1) 对于所有待分析的 API，采用规则 R1 对 API 在相邻版本中的异常进行完全匹配，如果匹配成功则将匹配到的一对异常分别从各自版本下的待匹配队列中移除。

2) 采用异常类型变更 R2、异常描述变更 R3、和异常断言变更 R4 规则对应的三个规则进行匹配。这里将依次使用各个信息过滤器，比较异常类型、描述、前断言信息是否一致。过滤器接受一组异常，根据过滤器类型返回过滤后的一组异常。如旧版本中的异常 e_1 经过第一个过滤器之后匹配到多个异常，那么所有被匹配的异常会被作为候选对象传递给下一个过滤器；如 e_1 未匹配到任何异常，则当前过滤器接受到的全部异常将被作为候选对象传递给下一个过滤器。如在过滤过程中， e_1 在新版本中唯一匹配到异常 e_2 ，则表明 e_1 和 e_2 指向同一个异常， e_1 和 e_2 将被记录并从各自的待匹配队列中移除。

3) 如经过步骤 2) 后仍然未找到唯一匹配的异常，将继续采用规则 R5 进行匹配。满足这种情况的可匹配异常往往是由于代码重构造成的。在这种情况下，距离异常最近抛出条件通常不会改变。因此，可提取距离异常抛出点最近的直接条件对应的前断言（关键前断言）信息用于匹配。对于异常 e_1 ，如果能找到唯一异常 e_2 ，它们的异常类型和异常关键前断言均相同，即使断言和描述信息不同， e_1 和 e_2 也会被匹配，记录后从各自的待匹配队列中移除。

4) 经过步骤 3) 后，待匹配异常集合规模可能减小，使得之前一对多匹配的异常变为唯一匹配。因此，可再次重复过程 2) 和 3)，直至匹配结果不变，即达到不动点。

5)如果多轮匹配结束后异常仍未被匹配，那么旧版本中的未匹配异常将被标记为异常删除，新版本中的未匹配异常将被标记为异常新增。

在图 2 代码中，JavaExP 根据规则 R2 匹配到 V1.4-V2.0 的变化，根据规则 R1 完全匹配了 V2.0-V2.7，最后根据规则 R5 匹配到 V2.7-V2.9 的变化，从而完整刻画了该 API 中异常的变化情况。

5.3. 异常敏感的API生命周期模型构造

经过异常匹配与变更分析后，可得到 API 在相邻版本中异常的变更结果。变更类型包含**定义 4**中声明的七类操作：API 新增、API 删除、异常新增、异常删除、异常类型变更、异常描述变更和异常断言变更。为了生成完整的生命周期报告，我们从初始版本开始，不断使用相邻版本的异常摘要构造更完整的生命周期报告，直至最新版本。

```
{
  "className": "org.apache.commons.io.FileUtils",
  "methodSignature": "<org.apache.commons.io.FileUtils: void moveFile(java.io.File, java.io.File)>",
  "modifier": "public",
  "added_version": "v1.4",
  "lifetime_label": "live in last version v2.13.0",
  "exceptions": [
    {
      "exceptionName": "org.apache.commons.io.FileExistsException",
      "modifier": "public",
      "added_version": "v1.4",
      "exceptionName_history": [
        {
          "version<2.0": "java.io.IOException"
        }
      ],
      "message": "\\\Qfile element in parameter '%s' already exists: '%s'\\E",
      "message_history": [
        {
          "version<2.9.0": "\\\Qdestination '\\E[\\s\\S]*\\Q' already exists\\E"
        }
      ],
      "preConditions": [
        [
          "parameter0 is not null",
          "parameter1 is not null",
          "virtualinvoke parameter0.<java.io.File: boolean exists()>() is not @",
          "virtualinvoke parameter0.<java.io.File: boolean isFile()>() is not @",
          "virtualinvoke parameter1.<java.io.File: boolean exists()>() is not @"
        ]
      ],
      "preConditions_history": [
        {
          "version<2.9.0": [
            [
              "parameter0 is not null",
              "parameter1 is not null",
              "virtualinvoke parameter0.<java.io.File: boolean exists()>() is not @",
              "virtualinvoke parameter0.<java.io.File: boolean isDirectory()>() is not @",
              "virtualinvoke parameter1.<java.io.File: boolean exists()>() is not @"
            ]
          ]
        }
      ],
      "keyPreCondition": [
        "virtualinvoke parameter1.<java.io.File: boolean exists()>() is not @"
      ],
      "keyPreCondition_history": []
    },
    {
      "...": ...
    }
  ]
}
```

图 6 图 2 中 API moveFile() 的生命周期模型

给定被分析项目 P 的 n 个版本 P₁,...,P_n，项目 P 的异常敏感的生命周期报告包含 P 的基本信息，以及 P₁,...,P_n 中所有 API 的异常敏感的 API 生命周期报告。对于 P 中的一个 API，其生命周期报告包含

API 的基本信息（类名、方法名、引入版本和移除版本/最终存在的版本）以及 API 中的异常列表。对于每一个异常，报告中包含该异常的引入版本，移除版本/最终存在的版本，异常类型、描述、前断言、关键前断言信息及其变更历史信息。根据该生命周期报告，可以获取异常的存在区间，以及在该区间上的详细变化情况。

图 6 给出对图 2 示例中异常实例的生命周期报告。在这个实例中，异常所在的 API 为 moveFile()，它在 1.4 版本被引入，在最新的 2.13 版本中依然存在。其中目标异常 e 共发生了如下变更，分别是：2.0 版本变更了异常类型；2.9 版本中更改了异常的描述文本；2.9 版本中更改了异常前断言中涉及到的方法调用。值得注意的是，在 2.7 版本中，虽然相关代码被开发者重构，但异常摘要信息分析表明，其异常抛出行未发生任何改变，因此，该版本未出现在变更报告中。

6. 工具实现与实验分析

基于本文提出的方法，我们实现了一种基于静态分析的 Java 程序 API 生命周期模型自动分析工具 JavaExP。该工具包含约 10k 行 Java 代码和 1.4k 行 Python 代码，依赖于底层分析框架 Soot 完成中间码提取、控制流图、函数调用图和控制依赖图^[12]等数据结构的构建。为了评估本文方法的有效性和效率，本章在多个基准数据集上对工具 JavaExP 开展了一系列实验，主要研究问题如下：

- **RQ1:** 在手工构造的和真实世界中的 Java 项目上，JavaExP 能否准确高效地提取异常摘要信息？
- **RQ2:** 在真实框架/库项目上，JavaExP 能否正确构造异常信息敏感的 API 的生命周期模型？
- **RQ3:** 在真实框架/库项目上，异常信息敏感的 API 的生命周期模型有何特征？

6.1. 实验设置

为回答 RQ1，我们手工构造了一个包含常见异常抛出方式的基准测试集 ExceptionBench^①，涉及到多种常见的 Java 特性。数据集中的六个类分别为：基本场景 Basic 类，其中包含无条件抛出、判空条件抛出、字符串取值条件抛出、字符串操作条件抛出、逻辑与/或条件抛出等；跨函数调用场景 MultipleCall 类，包括多种跨函数调用场景；多路径

^① ExceptionBench, <https://github.com/hanada31/JavaExP/tree/master/Evaluation/RQ1/ExceptionBench%20Code>

场景 `MultiplePath` 类，包含 `if-else` 分支路径和 `for` 循环路径；多个异常场景 `MultipleThrow` 类，包含同一函数内多个异常和跨过程调用导致的多个异常；类字段变量使用场景 `FieldValue` 类；和一个融合了多种场景的综合场景 `Motivation` 类；共包含 40 个异常。此外，本实验复用了 Nassif 等人构造的面向 Apache Commons IO 的异常断言标注集合^[14]。为保证对比的公平性，本实验仅将目标项目的源文件和对应 Jar 包作为输入，而未将任何项目外的第三方库、JDK 等代码作为分析目标，排除未显式抛出的异常和代码实现不在项目中的异常后，该数据集共包含 392 个独立异常。此外，本实验还选取了六个广泛使用的 Java 项目来评估工具在这些真实项目上的分析性能。评估标准包括异常摘要数量和运行时间等。这里对每个项目的分析时间上限均被设置为 2 小时。为回答 RQ2 和 RQ3，我们以 RQ1 中六个真实项目为演化分析目标，根据这些项目在 Maven 仓库中的代码发布情况，收集了共计 60 个历史版本 jar 包。随后，我们在这些版本上对真实项目中 API 的演化情况进行分析。对于同一项目，演化分析时仅考虑同级别变更版本。

在实验有效性评估的对比工具选择方面，由于尚没有对于异常信息敏感的 API 演化分析的直接对比工具，我们首先选择 Java 异常信息提取工具，对异常分析这一重要模块的精度进行评估，再人工检验 API 演化分析结果的有效性。经调研，工作^[15,16]可通过自然语言处理方式从 JavaDoc 文档或注释中提取异常信息，但由于文档/注释信息和代码信息常存在偏差，不能将文档信息中提取的异常信息作为演化分析的对象。工作^[14,17]通过机器翻译方法为异常抛出代码生成文档或通过自然语言处理技术自动生成测试用例，但其异常信息分析结果无法直接用于异常演化分析。基于此，本文选择了最新 SOTA 的 Java 异常前断言提取自动化工具 WIT^[10]，评估该工具与 JavaExP 在异常提取方面的能力差异。WIT 工具通过静态分析解析目标 Java 项目源代码，构造控制流图并提取跨过程路径约束，结合约束求解技术获得异常相关的变量约束信息，最终提取出 Java 异常的类型、前断言、描述等信息，该工具公开可获取。

6.2. 实验结果与分析

6.2.1. 异常摘要报告有效性评估 (RQ1)

在本文中，共包含两种类型的错误，其一是代码中存在异常 e_1 ，但不存在关于 e_1 的异常摘要报告，

我们将其定义为“异常未识别”错误（标记为 FN）；另一种是代码中存在异常 e_2 ，存在关于 e_2 的异常摘要报告，但异常摘要中部分信息未被正确提取（如提取的异常前断言信息错误或不完整），我们将其定义为“异常信息有误”错误（标记为 FP）。除此之外，当异常被正确识别，且异常摘要信息提取的完整且准确时，对应“异常信息正确”（标记为 TP）。基于 TP、FP、FN 的统计结果，我们分别使用公式 $Precision = TP / (TP+FP)$, $Recall = TP / (TP+FN)$, $F1\text{-Score} = 2 \times Precision \times Recall / (Precision+Recall)$ 计算方法的精度、召回率和 F1 分数。

表 3 工具在 ExceptionBench 数据集上的有效性

工具	TP	FP	FN	Precision	Recall	F1-Score
JavaExP	39	1	0	0.98	1	0.99
WIT	30	5	5	0.86	0.86	0.86

表 3 分别给出本文 JavaExP 工具和异常提取工具 WIT 工具在 ExceptionBench 数据集上的有效性评估结果。可以看到，JavaExP 成功为其中的 39 个异常生成了正确的异常摘要报告，其中 1 个误报是由于异常涉及复杂的数据值变更，导致前断言分析不准确。在 WIT 不能处理的 10 (5+5) 个异常中，5 个由于包含冗余且错误的约束或涉及复杂的数据值变更导致异常前断言提取结果有误，5 个涉及不支持的语法特性导致异常摘要未成功提取。在精度、召回率和 F1 分数三个度量指标上，JavaExP 均优于 WIT 工具。

表 4 工具在 DSCRIBE 数据集上的有效性分析

工具	TP	FP	FN	Precision	Recall	F1-Score
JavaExP	300	56	36	0.84	0.89	0.87
WIT	137	17	238	0.89	0.37	0.52

表 4 给出了工具 WIT 和 JavaExP 在公开基准测试集 DSCRIBE^[14]上的有效性分析结果。在该数据集上，WIT 正确生成的异常摘要数量为 137，不能正确生成摘要的异常数量为 255 (238+17)，其中有 238 个异常的摘要为空，17 个异常的摘要信息不准确。与之相比，JavaExP 成功生成了 300 个正确的异常摘要报告，不能正确生成摘要的异常数量为 92 (36+56)，其中有 36 个异常的摘要为空，56 个异常的摘要信息不准确。虽然 WIT 的分析精确度略高于 JavaExP，但其召回率显著下降。与 WIT 相比，JavaExP 同时实现了较高的精确度和召回率，F1 分数与 WIT 比相对提升了 67%。

通过对 JavaExP 错误结果的分类分析，我们发现对于 56 个摘要信息不准确的异常，其中的 22 个

异常受限于循环条件展开次数，11个异常存在无法正确分析的复杂关系，10个异常缺少部分正确路径，8个异常中被调用函数 callee 中的前断言约束无法正确映射到调用函数 caller 的参数，3个异常没有正确处理 try 语句中的异常抛出，2个异常的前断言条件自相冲突。对于另外 36 个摘要结果为空的异常，导致精度损失的一个原因是复杂跨函数参数传递增加了分析难度。如图 2 所示，随着版本更新，框架/库开发者在重构的过程中倾向于将异常抛出代码进行包装以便复用，这间接增加了分析的复杂性。在 Apache Commons IO 项目 V2.13 版本中，调用链长度不少于 5 的共有 578 处，调用链长度不少于 10 的共有 50 处，而调用链中任意一处异常摘要信息误差均可能影响最终的匹配情况。此外，JavaExP 对字节码的静态分析能力也影响了分析结果，如在处理位运算代码的断言条件时尚存在偏差、对静态变量的取值使用初始赋值，循环条件仅展开 0 次和 1 次等，这些分析影响了前断言中部分条件的准确性。

表 5 工具在真实项目上的分析结果

项目名	版本	LOC	WIT		JavaExP		
			总摘要数	时间/秒	独立摘要数	总摘要数	时间/秒
Commons IO	2.6	9,984	297	3,903	268	1,285	44
JGraphT	0.9.2	15,660	142	119	176	4,17	52
GraphStream	1.3	48,535	142	431	342	2,087	160
Guava	19.0	70,250	2,347	6,133	221	3,891	112
Nashorn	1.8	83,728	177	1,759	949	3,446	355
Android	10.0	546,655	524*	7,200	7,906	51,915	1743
合计/平均		129,135	3,692	19,545	9,862	62,624	2,466

进一步，我们在六个真实项目上进行分析性能的评估。表 5 给出了所选项目的名称、版本和 LOC

(不含注释的 Java 源码行数)、两个工具生成的异常摘要数量和分析时间。其中，对于大型的安卓框架代码，WIT 超时导致未完成分析，因此，仅统计其在两小时内生成的结果，并计算其中包含的异常摘要数量。对于六个被测项目，WIT 用时约 5.5 小时，提取的总异常摘要数量为 3,692。与之相比，JavaExP 用时仅 0.7 小时，提取的独立摘要数量为 9,862，总摘要数量为 62,624，分析效率提高约 7 倍，提取数量显著增加。基于这一结果，我们进一步分析了异常数量的增加是由于 JavaExP 分析到了更多的独立异常，还是由于独立异常在跨函数调用过程

中在不同调用路径中重复出现导致的。我们根据异常抛出方法、异常抛出语句位置信息进行去重后的异常数量计为独立异常的数量，独立摘要的数量少于总摘要数量。据统计，WIT 的总摘要数量(3,692)显著少于 JavaExP 的独立摘要数量(9,862)，由此可知，与 WIT 相比，JavaExP 不仅提取出更多的异常摘要结果，且成功分析了更多的独立异常。

实验表明，JavaExP 提取的异常摘要数量显著多于 WIT，且用时更短，带来这一优势的主要原因有以下三个方面。首先，JavaExP 基于字节码分析，不受限于新的 Java 语法特性，分析范围更广，能够正确处理 Java 的各种复杂语法特性支持，其分析能力不受到代码形式的影响。其次，JavaExP 对分析规模的限制更少，该方法并没有对每条路径上的节点数、函数内联后的节点数量等做严格限制，而是在遍历控制流路径时先提取终止于异常抛出的语句，仅分析异常抛出行为相关的代码切片，分析范围更为聚焦。此外，JavaExP 采用自底向上构建函数摘要的方式，对每个函数不会被重复分析，带来了明显的效率优势。除了效率优势，JavaExP 的分析准确度也较高。JavaExP 通过提取异常的类型、描述文本、前断言三类核心信息对异常进行刻画，在异常前断言分析时主动忽略了与当前异常抛出无关的非控制依赖条件，但沿着函数调用链追踪异常抛出必要的关键前置条件，提高了异常分析的准确性，这也为后续在不同版本中匹配异常的演化信息打下了良好的基础。

RQ1 结论：相比于现有异常分析工具，JavaExP 能够更加准确地提取异常的摘要信息，在现有数据集上，将分析精度提高了约 67%；通过跨函数摘要合并策略，将分析效率提高了 7 倍，并显著增加了成功提取的异常摘要数量。

6.2.2. API 生命周期模型构造正确性 (RQ2)

在 RQ2 中，我们选取六个项目中发布历史版本数量最多（19 个）的 Apache Commons IO 项目，人工确认 JavaExP 在该项目上 API 演化分析结果的有效性。对于 API 和异常增删修改的七种形式，为了保证公平性，本实验选取对象具体的方法为：1) 对于每种变更形式，首先根据各个 Java 类(class)文件中变更实例数量对 Java 类进行排序，同一 Java 类中的异常实例随机排序，获得异常变更实例的顺序列表；2) 根据需要选取的变更实例数量，在顺序列表中按照均匀分布采样间隔地选择实例；3) 考虑到异常前断言的数量相对较多，在选择时容易

选择到因方法封装在不同上层方法被重复调用的异常实例，为增加采样结果的多样性，该类别下会预先对异常调用链进行过滤，仅收集未包含相同异常抛出方法的实例。在实验中，我们对每种类别均收集 10 个实例，对实例总数不足 10 的变更形式采集其所有实例。经采样，共收集到 63 个变更实例用以人工检验。

表 6 API 演化分析的正确性

统计		API		异常			
		新增	删除	新增	删除	文本修改	类型修改
过程内	总数	10	10	10	10	10	3 10
	正确	10	10	10	10	10	3 [5/3]
跨过程	总数	10	10	10	10	10	10
	正确	10	10	10	10	9	10 [10/5]

表 6 给出了 API 生命周期模型构造正确性检验结果，评估时采用了过程内和跨过程两种评估设置。对于过程内设置，仅选择在当前方法中直接抛出的异常进行评估，而不考虑跨过程调用引入的其他异常。对于当前方法中抛出的异常，如果只考虑当前方法内出现的约束条件，分析结果均正确。如考虑其他方法调用带来的隐式约束，仅有 5 个断言信息变更行为正确，其中 3 个异常摘要前断言信息提取结果完全正确。对于跨过程设置，当前方法中直接抛出的异常和跨过程调用引入的其他异常均被作为评估对象。整体来说，基于跨过程的分析可以更加准确地获取被调用函数中抛出的深层异常和前置函数中的隐式约束。在异常条件修改变更结果中，5 个前断言信息提取结果完全正确，5 个结果虽不完全准确，但不影响对断言变更检测结果的正确性。如循环展开有限次和位运算约束提取结果形式上不完全准确，但变更前后能够显著区分。在异常描述变更结果中，有一处错误的异常匹配，其原因是代码重构后，原异常的类型、消息、前断言均发生改变，但方法中存在另一个与原异常类型和关键前断言均相同的异常，从而导致错误匹配。

```

1. public static boolean isFileNewer (final File file, final
File reference) {
2. -   Objects.requireNonNull(reference, "reference");
3. -   if (!reference.exists())
4. -     throw new IllegalArgumentException("...");
5. +   requireExists(reference, "reference");
6. }
```

```

7. + private static File requireExists (final File file, final
String fileParamName) {
8. +   Objects.requireNonNull(file, fileParamName);
9. +   if (!file.exists())
10. +     throw new IllegalArgumentException("...");
11. +   return file;
12. + }
```

(a) 重构但未改变异常摘要 [isFileNewer(), v2.8-v2.9]

```

1. public DeferredOutputStream (final int threshold,
final int initialBufferSize, final File outputFile) {
2. -   if (initialBufferSize < 0)
3. -     throw new IllegalArgumentException("...");
4. +   this(threshold, outputFile, null, null, null,
initialBufferSize);
5. }
6. + private DeferredOutputStream (final int threshold,
final File outputFile, final String prefix, final String suffix,
final File directory, final int initialBufferSize) {
7. +   memoryOutputStream = new ByteArrayOutputStream
OutputStream(checkBufferSize(initialBufferSize));
8. + }
9. + private static int checkBufferSize(final int
initialBufferSize) {
10. +   if (initialBufferSize < 0)
11. +     throw new IllegalArgumentException("...");
12. +   return initialBufferSize;
13. + }
```

(b) 重构（多层函数）但未改变异常摘要

[DeferredOutputStream(), v2.11-v2.12]

```

1. public static long sizeOf (final File file) {
2. -   if (!file.exists())
3. -     throw new IllegalArgumentException("...");
4. +   requireExists(file, "file");
5. }
6. + private static File requireExists (final File file, final
String fileParamName) {
7. +   Objects.requireNonNull (file, fileParamName);
8. +   if (!file.exists())
9. +     throw new IllegalArgumentException("...");
10. +   return file;
11. + }
```

(c) 重构且改变异常摘要[sizeOf(), 2.8-v2.9]

图 7 跨过程代码中的异常变更实例

图 7 给出了在 Apache Commons IO 项目中，跨

过程函数调用这一复杂场景下的三种典型的异常变更实例。其中，图 7 (a) 将对输入参数 reference 的校验代码封装到方法 requireExists() 中。代码变更前后，异常的前断言没有发生变化（红色为重构前，蓝色为重构后的目标参数）；图 7 (b) 的重构过程更加复杂，输入参数 initialBufferSize 的校验代码被重构到距离原方法两次调用的 checkBufferSize 中，重构后，异常的前断言同样没有发生变化；图 7 (c) 同样将对输入参数 file 的校验封装到方法 requireExists() 中，但重构后（第 7 行）增加了对 file 参数的非空校验，使得异常前断言发生了改变。示例中的三种跨过程代码重构场景均能够被工具正确认别。总体来看，跨过程策略下，演化分析的准确率为 98%，跨过程分析能够捕获到其他函数中存在的异常及其断言条件，变更分析结果较为准确。

RQ3 中异常演化分析将默认采用跨过程分析策略。

经人工总结，影响 API 中异常匹配的可能因素包括：1) 在跨过程传递分析中，异常断言分析的精度和过程间参数约束的分析传递影响最终的匹配结果；2) 开发者同时修改同一个异常的多个信息，导致难以通过单一变化严格限制匹配规则，需在尽量避免错误匹配的前提下，尽可能识别出存在差异的同一异常；3) 目前仅能匹配文本相等和逻辑相等，如果开发者换用语义相同的不同 API，因无法自动判断前后是否一致，会识别其为异常条件变更（如!isFile() 和 isDirectory() 函数）。如需精确判断语义一致性，需在后续研究中引入语义分析。

RQ2 结论： JavaExP 能够基于提取的异常摘要，准确构建 API 的生命周期模型，其中跨过程分析策略更为准确。部分异常的前断言信息存在精度损失，但对 API 演化分析的影响不大。

6.2.3. API 生命周期变更结果分析 (RQ3)

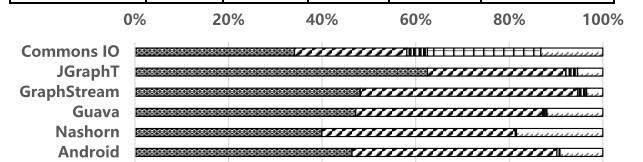
对于 RQ2 中的六个项目，我们在 Maven 仓库中收集了各项目的共计 60 个历史发布版本，并在表 7 中统计了各个项目的 API 变更情况。所有版本的分析时间共计 30 分钟。对于 API 本身的变更，新增 API 数量较多，随着版本演化，API 的数量整体趋向于一直增加，但也有部分 API 会被删除。当发生大版本重构时，API 变化较为明显。除了 API 的新增删除，JavaExP 还识别出了大量的异常变更行为。在所有的 75,433 个 API 中，约 14.3% 的 API 新增过异常抛出行为，13.9% 删除过原有的异常，6.5% 改过抛出条件，1.9% 改过异常描述文本，

0.1% 变更过异常类型。在异常敏感的 API 生命周期模型中，约 20% 的 API 在被引入后，异常信息在后续版本中发生过调整，这说明 API 中异常相关代码的调整是十分常见的，异常敏感的 API 生命周期构造能够更加精准的描述 API 的实际变更情况。

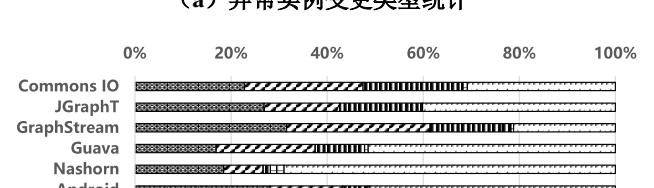
进一步的，我们在图 8 和表 8 中展示了六个项目中异常实例的变更情况。图 8 (a) 中统计了每个 API 中的发生变更的全部异常实例，当一个异常被封装并多次调用时会多次统计。可以看到，当考虑重复异常时，新增异常的数量占比最高，其次是删除异常的数量。实际上部分新增异常是被重复调用的。图 8 (b) 以独立异常为关注对象，异常多次调用时仅统计一次，表 8 给出了对应图 8 (b) 中独立异常变更的数量统计，与图 8 (a) 相比，新增删除异常的数量占比有所下降。

表 7 API 变更情况统计分析

项目名	#分析版本	#总数	#新增	#删除	#异常摘要改变
Commons IO	19	1,880	1,665	36	548 (29%)
JGraphT	7	2,493	1,859	740	665 (27%)
GraphStream	5	3,345	1,607	1,460	194 (6%)
Guava	14	3,772	1,868	666	848 (22%)
Nashorn	5	4,340	8	11	739 (17%)
Android	10	59,603	32,331	8,260	11,512 (19%)
总数	/	75,433	39,338	11,173	14,506 (20%)



(a) 异常实例变更类型统计



(b) 独立异常实例变更类型统计

图 8 异常变更情况统计

表 8 不同项目中独立异常变更统计

项目名	#异常	#新增	#删除	#类型修改	#描述修改	#条件修改
Commons IO	746	148	160	6	135	200

JGraphT	979	87	51	1	55	130
GraphStream	485	58	55	1	31	39
Guava	453	46	56	2	28	140
Nashorn	1,332	72	32	11	6	269
Android	11,471	1,669	901	21	310	3,039

在 JavaExP 检测到的异常语义行为的变更中，存在一些典型的行为模式。其中，1) 异常类型变更的主要模式为，将父类异常重构为子类、自定义异常变更为原生异常、使用更准确的异常等。如图 9 (a) 所示，通过将 IOException 修改为更具体的子类异常，便于上层应用代码更有针对性的捕获并处理；如图 9 (b) 所示，将自定义异常替换为原生异常，提高了与 Java 标准库或其他第三方库的兼容性；如图 9 (c) 所示，使用与实际发生的异常语义更接近的异常类型。2) 描述信息的变更原因包括使用更清晰的描述、修正文字错误以及代码重构等。如图 9 (d) 所示，开发者改用了更清晰的描述；图 9 (e) 中的变更修改了文字拼写错误；图 9 (f) 发生代码重构，由 Objects.requireNonNull() 方法代替完成对 sourceFile 参数的校验，从而导致的描述文字变更。3) 异常前断言更改原因则包括前置异常抛出点的增删、代码位置变动、代码重构等。如图 9 (g) 所示，开发者在前置路径上增加异常检查导致前断言条件变化；如前文中图 7 (c) 所示，代码重构导致前断言条件变更。

1. - throw new IOException(message); //父类
2. + throw new FileExistsException(message); //子类

(a) 异常类型：父类→子类 [moveFile(), v1.4-v2.0]

1. - throw new IOExceptionWithCause(message); //自定义类
2. + throw new IOException (message); //原生类

(b) 异常类型：自定义类→原生类 [parseBytes(), v2.4-v2.5]

1. - throw new IllegalArgumentException("fileDescriptor cannot be null");
2. + throw new NullPointerException("fileDescriptor cannot be null");

(c) 异常类型：修正异常类型 [ExifInterface(), v28-v29]

1. - throw new RuntimeException("not implemented!");
2. + throw new RuntimeException("GraphicGraph is used by display() and cannot recursively define display()");

(d) 异常描述：使描述清晰 [display() v1.0-v1.1.1]

1. - throw new IllegalArgumentException("..." + ", expected one of " + "...");

2. + throw new IllegalArgumentException("..." + ", expected one of " + "...");

(e) 异常描述：修复文字错误 [parseByteOrder(), v2.7-v2.8]

1. - if (sourceFile == null)
2. - throw new NullPointerException("Source must not be null");
3. + Objects.requireNonNull(sourceFile, "sourceFile");

(f) 异常描述：代码重构 [copyToDirectory(), v2.6-v2.7]

1. + Objects.requireNonNull(file, "file");
2. Objects.requireNonNull(chronoZonedDateTime,
"chronoZonedDateTime");

(g) 异常前断言：新增前置异常 [isFileNewer(), v2.11-v2.12]

图 9 异常信息变更典型行为模式

RQ3 结论：在代码演化过程中，不仅 API 的新增、删除行为较为常见，异常的新增、删除和更改行为也十分频繁。在 75,433 个被分析的 API 中，约有 20% API 的异常抛出行为了至少发生过一次改变，这些 API 共涉及超过七千多处独立的异常变更。相比于 API 的存在性生命周期模型，采用异常敏感的分析时，API 发生变动的比例提高了 18%，该模型能够更加精准地描述 API 的实际变更情况，对框架/库代码的开发者和使用者都具有指导意义。

6.2.4. 对实验有效性的威胁

在本文中，对实验有效性的威胁主要与数据集的构建与选取有关。1) 在手工基准测试集的构建阶段，设计思路的不同会在一定程度上影响在该数据集上的评估结果，这一偏差难以避免。为了保障测试集的公平性，本文在构建手工基准测试集时预先对抛出异常的基本场景进行分类，再按照类别设计数据集代码。对于这些场景，该数据集仅考虑具有指定特性的精简代码片段，用于测试异常分析工具在具有不同特性代码上的基础分析能力。我们注意到 WIT 不支持一些常见的语法特性，为保障公平性，我们仅根据数据集设计需要设计不同特性的代码片段，而未在设计后主动添加移除特定工具（如 WIT）不支持的语法特性。2) 在真实项目数据集的选取上，真实项目的异常抛出代码风格、函数封装复杂度、相邻版本代码变更差异等均会影响评估结果，为增强被测项目的代表性，本文复用已有的异常断言标注集合用于异常分析能力评估，并选取了六个广泛使用且具有多个版本的 Java 开源项目用于 API 变更分析评估，通过工具在不同被测项目上的整体结果评估工具的综合分析能力。

7. 相关工作

7.1. 异常摘要提取

异常机制是 Java 中正式的错误报告机制，为了能够及时有效地处理程序中的运行错误，开发者需合理地抛出、捕获并处理异常。程序崩溃时，打印的异常堆栈信息是错误调试的一类重要信息^[18]。由于异常机制的复杂性，研究人员围绕着异常的使用^[19]、异常抛出代码的编程指导^[20,21]、异常抛出行为的正确性测试^[22,23]、以及基于程序异常抛出信息的错误定位与修复^[24,25]等方向开展了一系列工作。其中，为了帮助开发人员理解程序的规范行为、了解代码中何时何处会抛出异常，异常的摘要中的前断言信息提取工作受到了广泛的关注，主要包括基于自然语言处理的和基于代码静态分析的两类方法。

7.1.1. 基于自然语言处理的断言提取

在开发过程中，断言信息可以帮助开发人员明确方法的使用规范，避免 API 演化导致的代码缺陷；在代码缺陷检测和定位时，前断言分析结果可以辅助测试人员构造高质量的测试用例，对满足/不满足断言的行为进行系统地测试。

基于自然语言处理的断言生成方法被广泛地应用，这类方法通过统计分析文档、注释等文本文件来推断方法的断言或测试预言信息^[4,15,16,26–28]。Tan 等人在@Tcomment^[11]中通过定义自然语言模式和使用启发式方法来推断程序的异常前断言，该方法仅关注空指针类型。与之相比，Goff 等人提出的 ToraDocu^[12,15] 通过解析 Javadoc 文档，自动为所有的异常行为构造测试预言，工作 JDoctor^[16]在此基础上扩展，实现了面向更多程序行为的断言提取。此外，Zhai 等人提出了从文档中自动生成 JML 规范的方法 C2S^[27]。由于大部分真实应用并不存在完整的 JML 规范，该方法仅基于 JDK 的规范文档进行训练，其模型不一定适用于其它的 Java 项目。基于自然语言处理的方法可以有效基于文本分析实现断言提取，但无论是方法文档或是代码注释，开发者对它们的编写情况都是不确定的。代码中的文档、注释信息既可能缺失，也可能在代码演化过程中未被及时更新，因此，这类方法适用于文档编写较为规范且被长期维护的大型项目。但在大量真实项目中，存在着文档缺失、不完整或未被及时维护的现象^[29–31]，无法准确体现 API 代码实现本身演化情况。

7.1.2. 基于代码分析的断言提取

基于静态代码分析的方法是提取断言信息^[32]的另一种重要方式。Buse 和 Weimer 基于 Java 异常分析工具 Jex^[33]提出了一种自动推断 Java 方法异常抛出条件的方法^[34]。该工作首先提取方法和异常的映射表，然后采用符号执行和跨过程数据流分析技术提取每个异常的抛出条件。由于该工作后向遍历了所有的控制流路径，在单个方法代码复杂、异常抛出前存在分支条件较多的情况下会出现路径爆炸问题；收集到路径约束后，该方法设计了一些约束处理规则以简化断言形式，但其生成的结果均是围绕所有程序变量的，而不是只关注异常和方法输入参数的关系。与之相似，Chandra 等人也采用后向符号执行技术，提出了一种推断最弱前断言的技术 SnuggleBug^[35]，它将问题泛化为如何找到从某入口点到达目标状态的前置条件，因此该方法不限于异常分析。为了解决 Java 多态虚函数调用关系分析带来的路径爆炸问题，该工作采用符号执行和函数调用图交错的按需分析方法以提高效率。但它们^[34,35]均未提供可公开获取的工具。

近期，Marcilio 等人^[10]提出了基于 Java 源码分析的轻量级异常前断言分析方法 WIT。该方法可以有效提取部分 Java 方法断言，但由于面向源代码，其分析受限于复杂的语法规则，如不能处理包含 for-each 循环语句、switch 语句，和 try/catch 块的代码；此外，基于源码的分析依赖于变量名称的匹配，在变量重新赋值时难以准确解析条件变量和输入参数的关系。WIT 项目的源码未公开，但工具可公开获取。

在基于代码分析的断言提取方法中，基于源码的分析可以有效提取部分方法的断言，但其受限于复杂且不断更新的 Java 语法规则、难以准确追踪内部变量和外部参数之间的复杂关系。此外，对于上层应用依赖的底层框架和第三方库，其源代码未必是可获取的。与之相比，基于字节码的分析不会受限于高级语言的语法规则，并支持开展精确的控制流和数据流追踪。为增加方法的普适性，适应不同版本的 Java 代码，并支撑框架/库源码不可获取的分析场景，JavaExP 采用了面向 Java 字节码的静态分析技术，通过追踪分析字节码中的异常抛出条件和变量取值，实现异常相关的 API 语义变更分析。

7.2. API 生命周期模型构建

API 生命周期模型常被用于上层应用的 API 误用检测或兼容性错误检测。Li 等人在工作 CiD^[4]中

提出了安卓生命周期模型 (ALM), CiD 从安卓开发框架中提取了完整的 API 方法列表, 并给出不同 API 存在的版本范围。Huang 等人提出了 CIDER^[36], 该工作关注 API 回调函数变化导致的兼容性问题, 该工作依赖于手工构建的回调函数调用协议一致性图。工作 ACID^[6]同时关注 API 调用问题和 API 回调函数兼容性问题, 该工作没有分析框架代码, 而是根据安卓框架官方提供的 API 差异列表轻量级地获取其生命周期。本文也关注于框架 API 生命周期的提取, 与这些工作相比, 不仅关注 API 的存在性问题, 即在不同版本中 API 的新增和删除情况; 还重点分析了 API 中异常抛出情况, 特别是同一个 API 中异常抛出条件、描述、类型等是否发生变化。

除了 API 方法的演化, 工作^[37]还关注了框架代码中字段 (Field) 信息的演化, 并关注了字段变化引发的上层代码缺陷。更多的工作^[5,38,39]关注与在给定 API 生命周期模型的基础上, 如何精确分析上层应用代码, 以找到 API 的误用问题, 我们的模型提取工作可以为这类研究提供支撑。

8. 总结与展望

针对框架/库项目和上层应用开发者在代码升级演化过程中难以准确获取其开发或使用的 API 变更行为这一问题, 本文基于静态分析方法, 提出了面向底层框架和第三方库的异常信息敏感的 API 生命周期模型生成方法, 形成原型工具 JavaExP。与已有工作相比, JavaExP 生成的异常摘要信息在准确率和分析效率方面均有大幅提高。与异常不敏感的 API 演化分析相比, 异常敏感的 API 发生变动的比例提高了 18%, 在六个真实框架/库项目的 60 个版本中发现了超过七千多处独立的异常变更。

这一工具可同时服务于框架/库的开发人员和使用人员。一方面, 对于框架/库的开发者, 应在发布新版本软件前, 通过 API 生命周期分析工具精确获取新版本代码中 API 中异常信息变更情况, 确保小版本升级时不产生 API 语义变更、大版本升级时及时将语义变更情况更新在文档中。另一方面, 对于应用开发者, 在对所使用的框架/库代码进行版本升级时, 可通过分析工具查看当前版本到新版本中 API 的方法变更和异常变更情况, 开展未捕获的异常分析和异常传播分析等应用层检测, 保障应用层 API 调用的正确性和鲁棒性。考虑到真实的大规模框架/库中异常信息变动非常频繁, 在后续的研究工

作中, 将本文提出的模型用于实际的缺陷检测, 基于异常信息敏感的生命周期模型增强对框架/库代码的兼容性检测能力。

致谢 诚挚感谢评阅老师对论文提出的改进意见!

参考文献

- [1] Hora A C, Robbes R, Valente M T, et al. How do developers react to API evolution? A large-scale empirical study. *Software Quality Journal*, 2018, 26(1): 161-191.
- [2] Bavota G, Vásquez M L, Bernal-Cárdenas C E, et al. The Impact of API Change- and Fault-Proneness on the User Ratings of Android Apps. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2015, 41(4): 384-407.
- [3] Wu W, Khomh F, Adams B, et al. An exploratory study of api changes and usages based on apache and eclipse ecosystems. *Empirical Software Engineering*, 2016, 21(6): 2366-2412.
- [4] Li L, Bissyandé T F, Wang H, et al. CiD: automating the detection of API-related compatibility issues in Android apps//Proceedings of the 27th ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis, ISSTA 2018, Amsterdam, The Netherlands, July 16-21, 2018. ACM, 2018: 153-163.
- [5] He D, Li L, Wang L, et al. Understanding and detecting evolution-induced compatibility issues in Android apps//Proceedings of the 33rd ACM/IEEE International Conference on Automated Software Engineering, ASE 2018, Montpellier, France, September 3-7, 2018. ACM, 2018: 167-177.
- [6] Mahmud T, Che M, Yang G. Android Compatibility Issue Detection Using API Differences//Proceedings of the 28th IEEE International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering, SANER 2021, Honolulu, HI, USA, March 9-12, 2021. IEEE, 2021: 480-490.
- [7] Yu D F, Chang C Y, Jiau H C, et al. Which API Lifecycle Model is the Best for API Removal Management? Proceedings of the Twelfth International Conference on Software Engineering Advances, ICSEA 2017, Athens, Greece, October 8 - 12, 2017, 2017: 230.
- [8] Mostafa S, Rodriguez R, Wang X. Experience paper: a study on behavioral backward incompatibilities of Java software libraries//Proceedings of the 26th ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis, Santa Barbara, CA, USA, July 10 - 14, 2017. ACM, 2017: 215-225.
- [9] Ge L, Shuai D, Xie J, et al. Review on Exception Analysis Methods

- for Software Supply Chain. *Journal of Software*, 2023, 34(6): 2606–2627 (in Chinese) (葛丽丽, 帅东昕, 谢金言等. 面向软件供应链的异常分析方法综述. *软件学报*, 2023, 34(6): 2606–2627)
- [10] Marcilio D, Furia C A. What Is Thrown? Lightweight Precise Automatic Extraction of Exception Preconditions in Java Methods//Proceedings of the IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution, ICSME 2022, Limassol, Cyprus, October 3-7, 2022. IEEE, 2022: 340-351.
- [11] Eckel B, Hou J. Java Programming Ideas: Vol. 2. Machinery Industry Press, 2002. (in Chinese) (Eckel B, 侯捷. Java 编程思想: Vol. 2. 机械工业出版社, 2002.)
- [12] Ferrante J, Ottenstein K J, Warren J D. The Program Dependence Graph and Its Use in Optimization. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 1987, 9(3): 319-349.
- [13] Cytron R, Ferrante J, Rosen B K, et al. Efficiently Computing Static Single Assignment Form and the Control Dependence Graph. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 1991, 13(4): 451-490.
- [14] Nassif M, Hernandez A, Sridharan A, et al. Generating Unit Tests for Documentation. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2022, 48(9): 3268-3279.
- [15] Goffi A, Gorla A, Ernst M D, et al. Automatic generation of oracles for exceptional behaviors//Proceedings of the 25th International Symposium on Software Testing and Analysis, ISSTA 2016, Saarbrücken, Germany, July 18-20, 2016. ACM, 2016: 213-224.
- [16] Blasi A, Goffi A, Kuznetsov K, et al. Translating code comments to procedure specifications//Proceedings of the 27th ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis, ISSTA 2018, Amsterdam, The Netherlands, July 16-21, 2018. ACM, 2018: 242-253.
- [17] Blasi A, Gorla A, Ernst M D, et al. Call Me Maybe: Using NLP to Automatically Generate Unit Test Cases Respecting Temporal Constraints//Proceedings of the 37th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering, ASE 2022, Rochester, MI, USA, October 10-14, 2022. ACM, 2022: 19:1-19:11.
- [18] Gu Y, Ma P, Jia X, et al. Progress on software crash research (in Chinese). *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2019, 49: 1383–1398 (in Chinese) (顾咏丰, 马萍, 贾向阳等. 软件崩溃研究进展. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 1383–1398)
- [19] Osman H, Chis A, Schaefer J, et al. On the evolution of exception usage in Java projects//Proceedings of the IEEE 24th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering, SANER 2017, Klagenfurt, Austria, February 20-24, 2017. IEEE Computer Society, 2017: 422-426.
- [20] Jia X, Chen S, Zhou X, et al. Where to Handle an Exception? Recommending Exception Handling Locations from a Global Perspective//Proceedings of the 29th IEEE/ACM International Conference on Program Comprehension, ICPC 2021, Madrid, Spain, May 20-21, 2021. IEEE, 2021: 369-380.
- [21] Zhong H. Which Exception Shall We Throw?//Proceedings of the 37th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering, ASE 2022, Rochester, MI, USA, October 10-14, 2022. ACM, 2022: 116:1-116:12.
- [22] Dalton F, Ribeiro M, Pinto G, 等. Is Exceptional Behavior Testing an Exception?: An Empirical Assessment Using Java Automated Tests//Proceedings of the Evaluation and Assessment in Software Engineering, Trondheim, Norway, April 15-17, 2020. ACM, 2020: 170-179.
- [23] Jiang S, Yan D. Approach to Testing Java Exception Handling Mechanism Quickly. *MINI-MICRO SYSTEMS*, 2005, 26(10): 1854-1857. (in Chinese) (姜淑娟, 闫大顺. 一种快速测试 Java 异常处理机制的方法. 小型微型计算机系统, 2005, 26(10): 1854-1857).
- [24] Yan J, Wang M, Liu Y, et al. Locating Framework-specific Crashing Faults with Compact and Explainable Candidate Set//Proceedings of the 45th IEEE/ACM International Conference on Software Engineering, ICSE 2023, Melbourne, Australia, May 14-20, 2023. IEEE, 2023: 172-183.
- [25] Wu R, Zhang H, Cheung S C, et al. CrashLocator: locating crashing faults based on crash stacks//Proceedings of the International Symposium on Software Testing and Analysis, ISSTA '14, San Jose, CA, USA - July 21 - 26, 2014. ACM, 2014: 204-214.
- [26] Pandita R, Xiao X, Zhong H, et al. Inferring method specifications from natural language API descriptions//Proceedings of the 34th International Conference on Software Engineering, ICSE 2012, June 2-9, 2012, Zurich, Switzerland. IEEE Computer Society, 2012: 815-825.
- [27] Zhai J, Shi Y, Pan M, et al. C2S: translating natural language comments to formal program specifications//Proceedings of the 28th ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering, USA, November 8-13, 2020. ACM, 2020: 25-37.
- [28] Dinella E, Ryan G, Mytkowicz T, et al. TOGA: A Neural Method for Test Oracle Generation//Proceedings of the 44th IEEE/ACM International Conference on Software Engineering, ICSE 2022, Pittsburgh, PA, USA, May 25-27, 2022. ACM, 2022: 2130-2141.
- [29] Zhong H, Meng N, Li Z, et al. An empirical study on API

- parameter rules//Proceedings of the 42nd International Conference on Software Engineering, Seoul, South Korea, 27 June - 19 July, 2020. ACM, 2020: 899-911.
- [30] Aghajani E, Nagy C, Vega-Márquez O L, et al. Software documentation issues unveiled//Proceedings of the 41st International Conference on Software Engineering, ICSE 2019, Montreal, QC, Canada, May 25-31, 2019. IEEE / ACM, 2019: 1199-1210.
- [31] Aghajani E, Nagy C, Linares-Vásquez M, et al. Software documentation: the practitioners' perspective//Proceedings of the 42nd International Conference on Software Engineering, Seoul, South Korea, 27 June - 19 July, 2020. ACM, 2020: 590-601.
- [32] Rak-amnouykit I, Milanova A L, Baudart G, et al. The raise of machine learning hyperparameter constraints in Python code//Proceedings of the 31st ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis, South Korea, July 18 - 22, 2022. ACM, 2022: 580-592.
- [33] Robillard M P, Murphy G C. Static analysis to support the evolution of exception structure in object-oriented systems. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2003, 12(2): 191-221.
- [34] Buse R P L, Weimer W. Automatic documentation inference for exceptions//Proceedings of the ACM/SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis, ISSTA 2008, Seattle, WA, USA, July 20-24, 2008. ACM, 2008: 273-282.
- [35] Chandra S, Fink S J, Sridharan M. Snufflebug: a powerful approach to weakest preconditions//Proceedings of the 2009 ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation, PLDI 2009, Dublin, Ireland, June 15-21, 2009. ACM, 2009: 363-374.
- [36] Huang H, Wei L, Liu Y, et al. Understanding and detecting callback compatibility issues for Android applications//Proceedings of the 33rd ACM/IEEE International Conference on Automated Software Engineering, ASE 2018, Montpellier, France, September 3-7, 2018. ACM, 2018: 532-542.
- [37] Mahmud T, Che M, Yang G. Android API Field Evolution and Its Induced Compatibility Issues//Proceedings of the ACM / IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement, Helsinki, Finland, September 19 - 23, 2022. ACM, 2022: 34-44.
- [38] Mutchler P, Safaei Y, Doupé A, et al. Target Fragmentation in Android Apps//Proceedings of the IEEE Security and Privacy Workshops, SP Workshops 2016, San Jose, CA, USA, May 22-26, 2016. IEEE Computer Society, 2016: 204-213.
- [39] Yang S, Chen S, Fan L, et al. Compatibility Issue Detection for Android Apps Based on Path-Sensitive Semantic Analysis//Proceedings of the 45th IEEE/ACM International Conference on Software Engineering, ICSE 2023, Melbourne, Australia, May 14-20, 2023. IEEE, 2023: 257-269.
- [40] Yan J, Liu H, Pan L, et al. Multiple-entry testing of Android applications by constructing activity launching contexts//Proceedings of the 42nd International Conference on Software Engineering, Seoul, South Korea, 27 June - 19 July, 2020. ACM, 2020: 457-468.
- [41] Yan J, Zhang S, Liu Y, et al. ICCBot: Fragment-Aware and Context-Sensitive ICC Resolution for Android Applications//Proceedings of the 44th IEEE/ACM International Conference on Software Engineering: Companion Proceedings, ICSE Companion 2022, Pittsburgh, PA, USA, May 22-24, 2022. ACM/IEEE, 2022: 105-109.
- [42] Cui B, Wang M, Zhang C, et al. Detection of Java Basic Thread Misuses Based on Static Event Analysis//38th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering, ASE 2023, Kirchberg, Luxembourg, September 11-15, 2023. IEEE, 2023: 1049-1060.



Yan Ji-Wei, Ph. D., assistant professor. Her current research interests include program analysis and software testing.

Huang Jin-Hao, B. S. His current research interests include program analysis.

Yang Heng-Qin, M. S. candidate. His current research interests include mobile software analysis.

Yan Jun, Ph. D., professor. His current research interests include program analysis and software testing.

Background

In the area of software engineering, the development of large-scale software systems typically relies on low-level frameworks or third-party libraries. However, these frameworks and libraries evolve independently of the applications built on top of them, posing challenges for maintaining code quality at the application level. For instance, modifications in the framework or library code, such as the addition or removal of APIs and changes to API semantics, can lead to version inconsistencies. These inconsistencies can degrade the quality of higher-level applications when developers update the frameworks or libraries. To mitigate this issue, it is crucial to analyze the evolution of APIs, i.e., constructing precise API lifecycle models for frameworks and libraries.

In contemporary times, current studies introduce the concept of API transformation model for detecting defects, overlooking the impact of semantic alterations within APIs, particularly in the evolution of exception-related code. To fill this gap, this paper adopts static analysis techniques to extract exception summary information in the framework API code, proposes a multi-step matching strategy to obtain the changing process of exceptions, and finally generates exception-aware API lifecycle models for the given framework/library project.

With this approach, we implemented an API lifecycle extraction tool JavaExP. Compared to the state-of-the-art tool, our tool achieves both higher precision and efficiency in exception information extraction, resulting in high precision in exception-aware lifecycle-model construction. The evaluation of real-world projects shows that, compared to the exception-unaware API lifecycle modeling, JavaExP can identify 18% times more API changes. Among the 75,433 APIs under analysis, 20% of APIs have changed their exception-throwing behavior at least once after API introduction. These APIs involve a total of more than 7k independent exception changes. The overall results show that the exception-aware lifecycle modeling can describe the evolution process of APIs more accurately.

The research in this paper is supported in part by the National Natural Science Foundation of China under grant No. 62102405 and 62132020, and in part by the Major Project of ISCAS (ISCAS-ZD-202302). Under these supports, we are interested in finding a new way to improve the bug detection ability by precisely modeling the program code. In this field, we have published numerous papers in top software engineering conferences, such as Refs [24,40-42].