

# 基于输出行为的蜕变关系识别框架 METRIC 的改进与实现

## 技术报告

付安

# 1 引言

软件测试是一种保障软件质量的技术，目的在于发现软件中潜藏的故障。随着软件工程的复杂程度不断提升，软件测试在整个软件开发周期中占比越来越大，并得到广泛的重视。据统计，在软件开发总工作量中，软件测试的工作量占到 40% 以上<sup>[1]</sup>。通常，软件测试通过有限的输入判定输出是否与预期一致来检查软件中是否潜藏故障。只有在可以毫不含糊地确认软件测试是否通过时才能认为这一次测试有用<sup>[2]</sup>，但是在某些情况下，软件测试中存在着 Oracle 问题，即软件测试人员无法确定软件的执行结果与预期结果是否相同，或者很难构造预期输出结果<sup>[3]</sup>。

蜕变测试<sup>[4]</sup>是缓解 Oracle 问题的一种软件测试技术，从成功的测试用例中构建新的测试用例，以揭露更深层次的软件故障。其原理是通过检查程序的多个执行结果之间是否满足一定的关系来检查程序中的故障<sup>[5]</sup>。蜕变测试在很多领域成功应用，包括医疗服务<sup>[6]</sup>、空中交通管制<sup>[7]</sup>、机器学习<sup>[8]</sup>等。尽管如此，蜕变测试技术与其他软件测试技术的创新性集成和蜕变测试技术的理论基础研究发展甚微，尤其体现在测试用例选取和蜕变关系识别这两个核心方面。Groce 等人认为蜕变关系的识别是一项需要手工完成的困难任务，即使专家也会感到发现蜕变关系是一件很困难的事情<sup>[9]</sup>。

为了解决上述问题，Chen 等人提出了基于 CHOC'LATE 测试用例生成方法<sup>[10]</sup>的蜕变关系识别框架 METRIC<sup>[11]</sup>，实现了蜕变关系识别的半自动化，大大减少了软件测试人员识别蜕变关系的工作量。传统的蜕变关系识别方法中，软件测试员需要同时考虑一个软件的多个输入参数和输出参数的变化，识别并记录其中潜在的蜕变关系。METRIC 的优点在于，让软件测试人员集中精力去比较两个由不同输入构成的完整测试帧，判断两者对应的输出之间是否存在一定的蜕变关系，而不是同时考虑一个系统的多个输入参数与输出参数，简化了蜕变关系的识别问题。

METRIC 的不足之处是没有完整测试帧选取策略。对于一个软件来说，由不同输入构成的测试帧的数目庞大，从其中选择两个测试帧并进行对比并不一定能够得到输出的变化关系并衍生为蜕变关系，故是否能选择到具有蜕变关系的两个完整测试帧很大程度上决定了 METRIC 蜕变关系识别效率的高低。相关支持工具 MR-GEN 仅实现了基于输入范畴或选项差别的测试帧选取方法，即通过判断两个测试帧在输入范畴与选项的相似程度来确定是否对这两个测试帧进行判断，但这种选择方法仍然会在判断过程中出现无法得到输出变化关系的情况，这样就会使 METRIC 的效率变得低下。

本研究将软件的输出行为引入 METRIC 中，提出了改进的 METRIC 方法并命名为 METRIC\*。以软件的输出行为作为突破口，为 METRIC 提供一种系统的测试帧选取策略，尝试对 METRIC 进行改进，以提高 METRIC 的蜕变关系识别效率。

本研究使用 Java 程序设计语言开发了 METRIC\*的支持工具 MR-GEN\*，将 METRIC\*中可自动化进行的部分用计算机实现，方便了软件测试人员的使用。

本研究对四个实际的程序进行了实例研究，将 METRIC 与 METRIC\*分别应用于联通计费服务、航空行李计费服务、费用补偿系统(EXP)及订餐系统(MOS)，分析了两种方法在蜕变关系识别上的差别，得出了如下结论：METRIC\*具有系统的测试帧选取策略，能够有效减少对没有蜕变关系的两个测试帧进行对比的情况，从而提高蜕变关系识别效率。另一个结论是 METRIC\*在输入选项组合与输出选项组合的关系为多对一时才能体现出它的优势。

本研究对满足测试帧覆盖的蜕变关系集与构建高故障检测能力蜕变关系集的方法进行研究，得出的结论是测试用例集的变异得分最低为 68.60%，最高为 91.67%，且蜕变关系集的多样性越高，其故障检测能力越强，故障检测能力越稳定。

## 2 背景知识

本章介绍蜕变测试相关概念和技术与国内外相关工作。

### 2.1 相关概念和技术

#### 2.1.1 蜕变测试

传统的软件测试技术通过比较测试用例的实际输出与预期输出是否相等来检验待测程序。但是在很多情况下，测试人员很难得到程序的预期输出，通过比较预期输出与实际输出是否相等来检验待测程序变得不可行。这就是软件测试中的 Oracle 问题。

蜕变测试是一种缓和软件测试中 Oracle 问题的方法，原理是通过比较程序的多个执行结果之间是否满足对应的蜕变关系来检验程序是否出错，不需要构造程序的预期输出。该方法认为成功的测试用例中包含着丰富的信息，可以用来构造新的测试用例以对程序进行更加深入的检测。

##### 定义 1：（蜕变关系）

设程序  $P$  用来计算函数  $f$ ， $x_1, x_2, \dots, x_n (n > 1)$  是  $f$  的  $n$  个输入，它们相对应的输出为  $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)$ 。若输入序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$  之间满足某种关系  $r(x_1, x_2, \dots, x_n)$  时，输出序列  $f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)$  同时满足某种关系  $r_f(f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n))$ ，即：

$$r(x_1, x_2, \dots, x_n) \Rightarrow r_f(f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)),$$

那么称  $(r, r_f)$  为程序  $P$  的一个蜕变关系<sup>[5]</sup>。

在程序  $P$  使用蜕变关系  $(r, r_f)$  进行蜕变测试时，将选择的成功测试用例称为原始测试用例，原始测试用例根据蜕变关系  $(r, r_f)$  生成的测试用例称为衍生测试用例。例如：对于一个功能为计算 sine 函数值的程序  $\sin(x)$ ，我们知道 sine 函数的一个关系是  $\sin(x) = \sin(x + 2 * \pi)$ 。给定两个测试用例  $x$  和  $x'$ ，如果  $x' = x + 2 * \pi$ ，那么  $\sin(x)$  的输出结果和  $\sin(x')$  的输出结果应当一致。输入  $x$  被称作原始测试用例， $x'$  被称作衍生测试用例，当输入由  $x$  变化为  $x'$  时输出不变化即为蜕变关系。

蜕变测试原理图如图 2-1 所示：

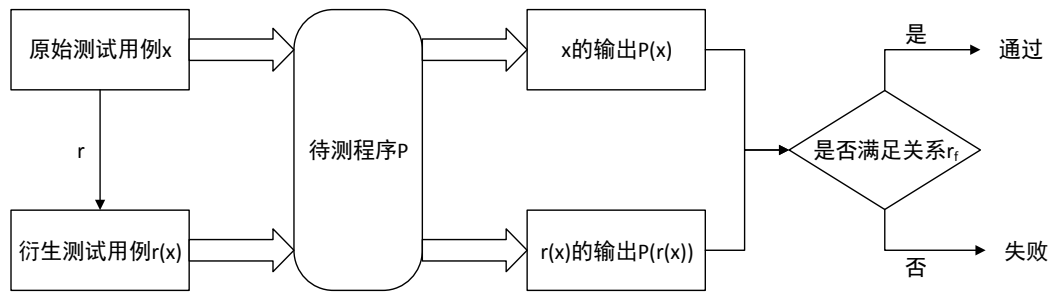


图 2-1 蜕变测试原理图

- (1) 利用其他测试用例生成方法为待测程序生成一定数量的测试用例；
- (2) 使用上述测试用例测试待测程序，成功的测试用例作为待测程序的原始测试用例  $x$ ；
- (3) 根据待测程序的必要属性，构造符合程序实际的蜕变关系 $(r, r_f)$ ，并根据构造的蜕变关系中输入关系  $r$  为原始测试用例生成对应的衍生测试用例  $r(x)$ ；
- (4) 使用原始测试用例与衍生测试用例执行待测程序，得到对应的输出结果  $P(x)$ 与  $P(r(x))$ ；
- (5) 检查原始测试用例的输出结果  $P(x)$ 与衍生测试用例的输出结果  $P(r(x))$  是否满足蜕变关系的输出关系  $r_f$ 。若不满足  $r_f$ 则程序有故障，若满足  $r_f$ 则说明此蜕变关系不能检测到程序的故障。

### 2.1.2 测试用例生成方法 CHOC'LATE

METRIC 蜕变关系识别框架是在 CHOC'LATE 测试用例生成方法的基础上建立起来的，在 METRIC 框架介绍之前，将阐述有关 CHOC'LATE 方法的概念，包括范畴(category)、选项(choice)及完整测试帧(complete test frame)。

#### 定义 2：（范畴）

程序参数或环境条件的一个主要属性或特征称为范畴(category)。

对于每一个参数或环境条件，测试人员用短语在规格说明书中对它进行标记，目的是描述相对于这个参数或环境条件，功能单元是如何运转的。

#### 定义 3：（选项）

与范畴相关联的各种可能的值被分成互不相交的子集，这些子集被称为选项(choice)。假设选项中的每一个值可以使功能单元有相似执行行为或产生相似的输出。

一个范畴可以有多个选项。

#### 定义 4: (完整测试帧)

使程序正常执行的一组选项的集合称为完整测试帧(**complete test frame**)。

测试用例的生成则通过对一个完整测试帧当中每个选项的实例进行组合的方法。

CHOC'LATE 测试用例生成方法是一种使用范畴、选项和完整测试帧并根据规格说明书生成待测程序测试用例的系统的方法。该方法包含以下六个步骤:

- (1) 将功能规格说明书分解为可以被分别进行测试的功能单元;
- (2) 对于每一个功能单元,确定影响其执行行为的参数和环境条件,并定义范畴和与之关联的选择;
- (3) 为每一个功能单元设计一个选择关系表 T;
- (4) 对于每一个选择关系表 T,构建与之对应的选择优先次序表 P。P 为生成测试帧提供“选择”的相对使用优先级;
- (5) 根据选择关系表 T 和与之对应的选择优先次序表 P,构建测试帧集合;
- (6) 根据每个构建的测试帧生成测试用例。

### 2.1.3 蜕变关系识别框架 METRIC

METRIC 是一种系统的蜕变关系识别方法,通过对 CHOC'LATE 测试用例生成方法生成的完整测试帧进行对比得到蜕变关系。METRIC 选择两个有区别的完整测试帧,这两个完整测试帧的特点是有一个选项不同或多个选项不同,然后让软件测试人员集中精力去比较这两个测试帧,判断两者对应的输出之间是否存在一定的蜕变关系。METRIC 蜕变关系识别框架包含以下三个步骤:

- (1) 选择两个相关且不同的完整测试帧作为软件测试人员识别蜕变关系的候选对。
- (2) 让软件测试人员判定选定的候选对是否对蜕变关系识别有用,如果有用,则让软件测试人员对蜕变关系进行描述。
- (3) 重新从(1)步骤开始,重复整个过程直到所有候选对耗尽,或者预先设定好需要生成的蜕变关系的数量已经达到。

当候选对中存在与之关联的蜕变关系时,称这个候选对有用;当候选对中不存在与之关联的蜕变关系时,称这个候选对没有用。

Chen 等人开发了 METRIC 的支持工具 MR-GEN。MR-GEN 工具实现了对存

储完整测试帧文件的读取、让用户选择判断的候选对类型、为用户显示候选对的细节、记录用户定义的对边关系及将蜕变关系输出至 html 文件五个功能。

## 2.2 文献综述

### 2.2.1 蜕变测试技术研究

蜕变测试是一种缓和软件测试中 Oracle 问题的革新性方法。原理是通过比较程序的多个执行结果之间的关系来检验程序是否出错,从而不需要构造程序的预期输出,缓和了软件测试中的 Oracle 问题。Chen 的观点认为,成功的测试用例中包含着丰富的信息,不可任意抛弃。选取成功的测试用例为蜕变测试中的原始测试用例,然后根据一定的蜕变关系来构造衍生测试用例。将原始测试用例与衍生测试用例输入至程序中运行得到各自对应的执行结果。蜕变测试通过比较原始测试用例的执行结果与衍生测试用例的执行结果之间是否满足一定的蜕变关系来测试程序的。

Chen 等人在 2004 年研究了蜕变测试和特殊用例测试在程序错误检测上的差异<sup>[12]</sup>。研究得出的结论是:蜕变测试能够发现特殊用例测试不能够发现的错误;特殊用例测试的缺陷在于不能够确定一个特殊用例测试用例集是否是可靠的,蜕变测试通过判断输出是否满足蜕变关系缓和了这一问题;蜕变测试可以作为特殊用例测试的一种补充。

Chen 等人在 2004 年通过案例研究了关于自动化测试的优良蜕变关系选取策略<sup>[13]</sup>,得出的结论是:(1)一个问题领域的理论知识不能够作为区分蜕变关系好与坏的标准;(2)优良的蜕变关系应该是那些可以使程序的多个执行尽可能不同的蜕变关系。

Mayer 和 Guderlei 在 2006 年通过实证研究方法研究了优良蜕变关系的选择<sup>[14]</sup>。研究显示:(1)形成等式的蜕变关系相对于其他蜕变关系来说检错能力较弱;(2)如果蜕变关系是一个两边都为线性组合的等式,那么它不会对错误的增加有影响;(3)好的蜕变关系由许多逻辑符号构成;(4)如果蜕变关系接近于典型算法所使用的策略,那么他们的适用性有限。

Liu 等人在 2014 年通过对五个程序的实验研究了蜕变测试缓解 Oracle 问题的效果<sup>[15]</sup>,回答了蜕变测试缓解 Oracle 问题的能力、测试人员是否能简单并成功地使用蜕变测试发现错误和影响蜕变测试效果的关键因素三个问题。研究发现,对于每个程序来说,蜕变关系集合与预期测试结果有相近的错误发现能力,并且蜕变测试的成本效率可以通过减少使用蜕变关系的数目来提升。另一个发现是影

响蜕变测试的成本效率的关键因素是所使用蜕变关系的多样性。

Chen 等人在 2015 年提出了 METRIC 蜕变关系识别框架。METRIC 基于 CHOC’LATE 测试用例生成方法,实现了蜕变关系识别的半自动化。它让软件测试人员集中精力去比较两个由不同输入构成的测试帧,判断两者对应的输出之间是否存在一定的蜕变关系。相比于传统的同时考虑一个系统的输入输出两方面,METRIC 以系统地方法进行蜕变关系识别,大大减少了软件测试人员识别蜕变关系的工作量。

吴鹏提出了迭代蜕变测试<sup>[20]</sup>,并就此方法提出了迭代蜕变测试算法(IMT)。吴鹏通过 MTest 测试环境对迭代蜕变测试进行研究后发现:迭代蜕变测试技术优于蜕变测试技术,并且在测试用例生成方面具有显著的高效性。

董国伟等人认为,一些蜕变关系在蜕变测试中的检错能力不足,并在 2008 年提出了复合蜕变关系构造方法<sup>[21]</sup>。这种方法以成对的方式将现有的蜕变关系组合起来产生新的蜕变关系。由于新的复合蜕变关系含有所有形成它的蜕变关系的优点,故其错误检测能力优秀;另一方面,蜕变关系的数量会大幅减少,因此一个程序可以使用更少的测试用例来测试。研究发现:在复合蜕变关系使用后,测试效率大幅增加。

### 2.2.2 蜕变测试技术应用

Chen 等人在 2009 年将蜕变测试技术应用于生物信息学软件的测试<sup>[16]</sup>。在研究中蜕变测试被应用于 GNLab 和 SeqMap 进行软件错误的检测。实验发现蜕变测试技术在测试时简单易用,缓解了生物信息学软件测试中难以确定软件输出的问题,蜕变测试技术也成功应用于实际软件的错误检测。

Segura 等人在 2011 年使用蜕变测试技术让特征模型测试数据的生成自动化<sup>[17]</sup>,并对利用变异测试方法生成的特征模型进行错误检测。结果发现绝大多数错误可以被自动发现,且蜕变测试技术在特征模型错误检测方面具有高效性和有效性。

Poon 等人在 2014 年对电子数据表的错误检测应用了蜕变测试技术<sup>[18]</sup>。结果显示蜕变测试技术在电子表格错误检测方面卓有成效,并且作为一种普通的技术,终端用户可以很容易地将它使用在各种各样的电子表格程序上。

吴鹏等人在 2005 年对于蜕变测试和特殊用例测试进行了实例研究<sup>[19]</sup>,提出了基于蜕变测试方法的集成测试环境 MTest。分别以变异得分和错误发现率为度量指标,分析和对比了特殊用例测试、以特殊测试用例和随机测试用例为源测试用例的蜕变测试这三种方法的测试能力和效率。实验结果表明,蜕变测试与特殊



用例测试之间是互补的，随机测试用例在测试能力和效率上优于特殊测试用例。

本章介绍了蜕变测试、测试用例生成方法 CHOC'LATE 和蜕变关系识别框架 METRIC 的相关基础知识与蜕变测试技术研究和应用的相关国内外工作。

## 3 METRIC 改进方案研究

本章介绍将输出行为引入 METRIC 的改进方案，提出了改进的框架 METRIC\*，并举例演示了 METRIC\*的蜕变关系识别流程。

### 3.1 基本思想

METRIC 中没有明确的测试帧选取策略，相关支持工具 MR-GEN 仅实现了基于输入范畴或选项差别的测试帧选取方法，但这种选择方法仍然会在判断过程中出现无法得到输出变化关系的情况。因此，为 METRIC 提供一种系统的测试帧选取策略是改进 METRIC 的一条可行的道路，提高 METRIC 的蜕变关系识别效率。

Liu 等人在研究中发现<sup>[22]</sup>，在传统的分类测试方法中，存在着相同区间对应不同输出行为的现象。这种发现意味着输入域的分区对于软件故障的检测并非严格有效。为解决这一问题，Liu 等人通过在测试帧中加入输出行为，将 CHOC'LATE 方法改进为同时包含输入与输出行为的 CHOC'LATE-DIP 方法。从蜕变测试的角度来考虑这个问题，就会发现：如果将同时包含输入与输出行为的两个测试帧构成一个候选对，那么进行蜕变关系识别时就可以直观地从候选对中输出的变化来确定候选对所关联的蜕变关系，这对蜕变关系的识别是一种改进。

### 3.2 改进方案

本研究将软件的输出行为引入 METRIC 中，提出了改进的 METRIC 方法并命名为 METRIC\*。以软件的输出行为作为突破口，为 METRIC 提供一种系统的测试帧选取策略，对 METRIC 进行改进。具体思路如下：首先对软件的输出行为划分范畴(O-category)并定义选项(O-choice)，建立包含输入输出的完整测试帧(IO-CTF)；然后将所有的完整测试帧按输出选项组合分类，即所有 O-choice 组合相同的 IO-CTF 为一组；最后进行组内比较与组间比较并得出蜕变关系。组内比较即一个 O-choice 组合对应组内的完整测试帧进行两两对比并得出蜕变关系；组间比较即从两个不同 O-choice 组合对应的组内分别选取一个测试帧，然后将这两个测试帧进行对比并得到蜕变关系。

METRIC\*的蜕变关系识别流程如图 3-1 所示：

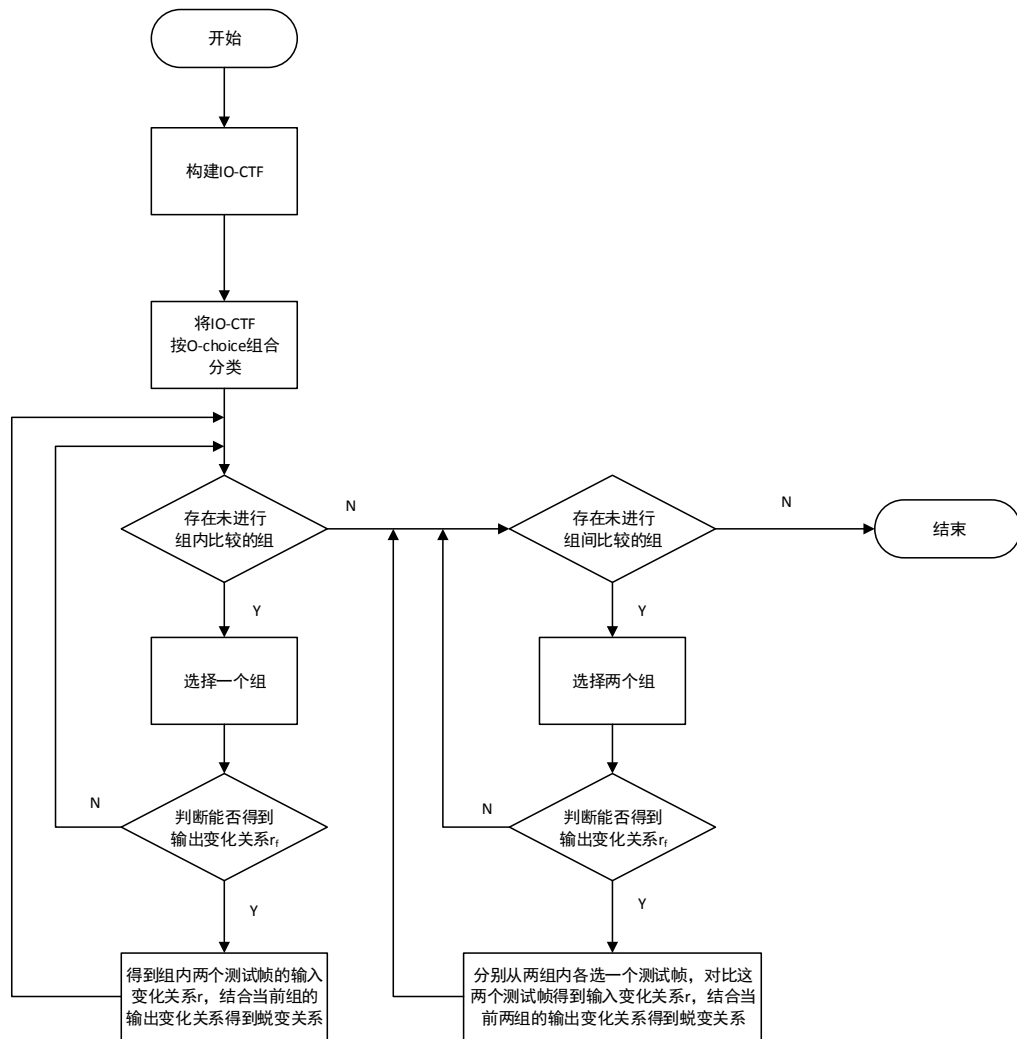


图 3-1 METIRC\*蜕变关系识别流程图

- (1) 将软件的输出行为划分范畴和选项并纳入测试帧中, 构建包含输入输出的完整测试帧(IO-CTF), 然后执行 (2);
- (2) 将 IO-CTF 按输出选项(O-choice)的组合分类, 即所有输出选项组合相同的 IO-CTF 为一组, 然后执行 (3);
- (3) 判断是否存在未进行组内比较的组, 若存在则执行 (4), 若不存在, 则执行 (6);
- (4) 选择一个组进行组内比较, 方法是把这个组对应的输出选项组合进行自身对比, 判断是否能够得出在输出选项组合不变的情况下输出的变化关系  $r_f$ 。如果能够得出输出的变化关系  $r_f$ , 则执行 (5), 否则将当前组标记为已完成了组内比较, 并执行 (3);
- (5) 在当前组中选择两个测试帧组成候选对, 对比两个 IO-CTF 的输入组合并得到输入的变化关系  $r$ , 将这两个 IO-CTF 输入的变化关系  $r$  与

这个组的输出变化关系  $r_f$  组合, 即可得到一条蜕变关系。其形式为: 当输入满足  $r$  时, 输出满足  $r_f$ 。重复当前步骤直到组内每个测试帧与组内其他测试帧都组成过候选对并判断了输入变化关系, 将当前组标记为已经完成了组内比较, 然后执行 (3);

- (6) 判断是否存在两个未配形成候选组对并进行组间比较的组, 若存在则执行 (7), 否则执行 (9);
- (7) 在所有的组中选择两个未配对的组构成候选组, 标记为 1 组和 2 组, 将 1 组与 2 组的输出选项组合进行对比, 判断是否能够得出在输出选项组合从 1 组输出选项组合变化至 2 组输出选项组合的情况下得到输出的变化关系  $r_f$ 。如果能够得到输出的变化关系  $r_f$ , 则执行 (8), 否则将 1 组标记为已经与 2 组配对, 2 组标记为已经与 1 组配对, 然后执行 (6);
- (8) 在 1 组中选择一个 IO-CTF, 标记为 IO-CTF1, 在 2 组中选择一个测试帧, 标记为 IO-CTF2, 将 IO-CTF1 与 IO-CTF2 组成候选对, 判断两个测试帧的输入选项组合的变化关系  $r$ 。将这两个测试帧输入变化关系  $r$  与两个组的输出变化关系  $r_f$  结合, 即可形成一条蜕变关系, 其形式为: 当输入满足  $r$  时, 输出满足  $r_f$ 。重复当前步骤直到 1 组中每个 IO-CTF 与 2 组中每个 IO-CTF 均组成过候选对并判断了输入变化关系, 然后将 1 组标记为已经与 2 组配对, 将 2 组标记为已经与 1 组配对, 并执行 (6);
- (9) 结束。

### 3.3 应用举例

从上一节的方法论中读者可能仍然不理解 METRIC\* 的整个流程, 下面举一个实例来演示 METRIC\* 的整个流程。

某一处理信用卡系统。输入为(1)信用卡的卡号, (2)状态, (3)是否有经理特别允许, (4)额度, 以及(5)操作金额。输出为“接受”或者“拒绝”。

该系统的基本流程为:

第一步: 检查卡号是否存在, 若存在, 转第二步; 若不存在, “拒绝”。

第二步: 检查信用卡状态, 若为“激活”, 转第四步; 若“未激活”转第三步。

第三步: 若有经理特别允许, “接受”; 若无经理特别允许, “拒绝”。

第四步：若操作金额大于额度，“拒绝”；否则，“接受”。

我们首先依据上一节流程中（1）对该信用卡系统进行范畴选项划分，得到如表 3-1 和表 3-2 的输入范畴(I-category)和选项(I-choice)与输出范畴(O-category)和选项(O-choice)：

基于输出的METRIC，MT是为了解决oracle problem 就是不知道输出或者很难得到输出... 这样基于输出的，另外如果是一个数值问题输出是什么？

表 3-1 输入范畴和选项划分

I-category	I-choice
1. 卡号	1a. 存在 1b. 不存在
2. 状态	2a. 激活 2b. 未激活
3. 特别允许	3a. 有 3b. 无
4. 操作金额	4a. ≤ 额度 4b. > 额度

表 3-2 输出范畴和选项划分

O-category	O-choice
1. 是否接受	1a. 接受 1b. 拒绝

输入范畴选项与输出范畴选项划分完毕后，我们将不同范畴中的选项进行组合，形成 IO-CTF。得到如表 3-3 的 IO-CTF：

表 3-3 IO-CTF

{1a,2a,3a,4a;1a}	{1a,2a,3a,4b;1b}	{1a,2a,3b,4a;1a}	{1a,2a,3b,4b;1b}
{1a,2b,3a,4a;1a}	{1a,2b,3a,4b;1a}	{1a,2b,3b,4a;1b}	{1a,2b,3b,4b;1b}
{1b,2a,3a,4a;1b}	{1b,2a,3a,4b;1b}	{1b,2a,3b,4a;1b}	{1b,2a,3b,4b;1b}
{1b,2b,3a,4a;1b}	{1b,2b,3a,4b;1b}	{1b,2b,3b,4a;1b}	{1b,2b,3b,4b;1b}

然后我们根据流程中（2）将 IO-CTF 分组，输出为 1a 的 IO-CTF 为一组，输出为 1b 的 IO-CTF 为一组。结果如表 3-4 所示：

表 3-4 IO-CTF 分类

组别	完整测试帧			
Ia 组	{1a,2a,3a,4a;Ia}	{1a,2a,3b,4a;Ia}	{1a,2b,3a,4a;Ia}	{1a,2b,3a,4b;Ia}
Ib 组	{1a,2a,3a,4b;Ib}	{1a,2a,3b,4b;Ib}	{1a,2b,3b,4a;Ib}	{1a,2b,3b,4b;Ib}
	{1b,2a,3a,4a;Ib}	{1b,2a,3a,4b;Ib}	{1b,2a,3b,4a;Ib}	{1b,2a,3b,4b;Ib}
	{1b,2b,3a,4a;Ib}	{1b,2b,3a,4b;Ib}	{1b,2b,3b,4a;Ib}	{1b,2b,3b,4b;Ib}

接下来是流程中（3）判断是否存在未进行组内比较的组。由于我们还未进行任何组内比较，所以执行（4）进行组内比较。

首先选择 Ia 组，将输出选项组合 Ia 进行自我比较，可以得到的输出变化关系  $r_f$ ：输出不变化且为接受。此时我们得到了输出的变化关系，进行（5），即在当前组内选择两个 IO-CTF 进行比较，得到输入变化关系。在 Ia 组中共有 4 个 IO-CTF，每一个 IO-CTF 与另外三个组成候选对进行对比，共需要进行 6 次( $C_4^2$ )。我们选择 {1a,2a,3a,4a;Ia} 与 {1a,2a,3b,4a;Ia} 为例，比较输入选项组合我们可以得到输入的变化关系  $r$ ：卡号为存在且不变化，状态为激活且不变化，操作金额为小于等于额度且不变化，特别允许由有变为无。将输出变化关系  $r_f$  与输入变化关系  $r$  结合即可得到蜕变关系：在卡号为存在且不变化、状态为激活且不变化、操作金额为小于等于额度且不变化及特别允许由有变为无的情况下，输出不变化且为接受。将 Ia 组内每个 IO-CTF 与其余三个都组合成候选对并得到输入变化关系与蜕变关系后，Ia 组的组内比较就完成了。更换 Ib 组进行组内比较。

将 Ib 组的输出选项组合进行自我比较，可以得到输出变化关系  $r_f$ ：输出不变化且为接受。得到输出变化关系后进行（5），判断组内 IO-CTF 之间的输入变化关系  $r$ 。在 Ib 组中共有 12 个 IO-CTF，每一个 IO-CTF 与另外十一个组成候选对进行对比，共需要进行 66 次 ( $C_{12}^2$ )。我们选择 {1a,2a,3a,4b;Ib} 与 {1a,2a,3b,4b;Ib} 为例，比较输出选项组合我们可以得到输入的变化关系  $r$ ：卡号为存在且不变化，状态为激活且不变化，操作金额为大于额度且不变化，状态从激活改变为未激活。将输出变化关系  $r_f$  与输入变化关系  $r$  结合即可得到蜕变关系：在卡号为存在且不变化、状态为激活且不变化、操作金额为大于额度且不变化与状态从激活改变为未激活的条件下，输出不改变且为拒绝。将 Ib 组内每个 IO-CTF 与其余十一个都组合成候选对并得到输入变化关系与蜕变关系后，Ib 组的组内比较就完成了。至此组内比较全部完成，下一步执行（6），即判断是否存在两个未配对并进行组间比较的组。由于还未进行组间比较，故执行（7）。

由表 4-4 我们得知，共有两个 IO-CTF 组，所以仅仅能将 Ia 组与 Ib 组结合为候选组进行组内比较。将 Ia 组与 Ib 组的输出选项组合进行比较，我们可以得到从 Ia 输出选项组合变化到 Ib 输出选项组合的变化关系  $r_f$  为：输出由接收变化为拒绝。得到输出变化关系后，执行 (8)，即将一个组中每一个 IO-CTF 与另一个组中每一个 IO-CTF 结合为候选对并判断输入变化关系  $r$ 。Ia 组内有 4 个 IO-CTF，Ib 组内有 12 个 IO-CTF，将 Ia 组内每一个 IO-CTF 与 Ib 组内每一个 IO-CTF 结合形成候选对并对比，需要进行 48 次 ( $12 \times 4$ )。以  $\{1a, 2a, 3a, 4a; Ia\}$  与  $\{1a, 2a, 3a, 4b; Ib\}$  为例说明组间 IO-CTF 比较的过程。在 Ia 组选择一个 IO-CTF  $\{1a, 2a, 3a, 4a; Ia\}$ ，在 Ib 组选择一个 IO-CTF  $\{1a, 2a, 3a, 4b; Ib\}$ ，对比两者的输入选项组合，我们可以得到从 Ia 输入选项组合变化到 Ib 输入选项组合的变化关系  $r$ ：卡号为存在且不变化，状态为激活且不变化，特别允许为有且不变化，操作金额由小于等于额度变化为大于额度。将输出变化关系  $r_f$  与输入变化关系  $r$  结合即可得到蜕变关系：在号为存在且不变化、状态为激活且不变化、特别允许为有且不变化及操作金额由小于等于额度变化为大于额度的情况下，输出由接收变化为拒绝。将 Ia 组内每一个 IO-CTF 与 Ib 组内每一个 IO-CTF 进行组合并完成对比得到输入变化关系与蜕变关系后，组间比较就完成了。

本章介绍了改进的蜕变关系识别框架 METRIC\*，使用信用卡系统对 METRIC\* 的蜕变关系识别流程进行了详尽的描述。

## 4 工具设计与实现

本节介绍了 METRIC\*支持工具 MR-GEN\*的设计、实现过程中的关键问题与工具使用方法的展示。

### 4.1 需求分析

在 MR-GEN 的基础上，扩展新的功能，形成新工具 MR-GEN\*。新功能包括：

(1) 对记录 IO-CTF 及范畴与选项描述的 **xlsx** 文件的读取。

METRIC\*引进输出范畴和选项，并结合输入范畴和选项形成了 IO-CTF。在 MR-GEN 中支持读取仅包含输入的完整测试帧及范畴和选项描述的 **xlsx** 文件。需要再加入读取新加入的输出选项及输出范畴与选项描述的功能，以满足 METRIC\*的需求。需要对包含完整测试帧及范畴和选项描述的 **xlsx** 文件进行进一步组织，把输出范畴与选项加入进去，并设立区别输出范畴和输出选项与输入范畴和输入选项的规则，方便支持工具的读取。

(2) 对 IO-CTF 依据 O-choice 组合进行分组。

METRIC\*与 METRIC 的一个很大的区别是对 IO-CTF 进行分组，分组的依据是 O-choice 组合，所有 O-choice 组合相同的 IO-CTF 为一组。MR-GEN 中仅支持对两个完整测试帧的比较，需要加入依据 O-choice 组合对 IO-CTF 进行分组这一功能，满足 METRIC\*的需求。

(3) 定义输出变化关系。

对于同组内蜕变关系识别和不同组蜕变关系识别，最先要进行的一个步骤就是得出 O-choice 组合的变化关系。所以支持工具应当为用户提供两个 O-choice 组合并让用户判断变化关系。若存在输出变化关系  $r_f$ ，则记录  $r_f$  并进行组内和组间蜕变关系识别。若不存在  $r_f$  则更换候选组。

(4) 定义输入变化关系。

输入变化关系通过对比两个 IO-CTF 的输入选项组合得到。支持工具应当为用户提供两个 IO-CTF 并让用户判断两个输入选项组合之间的变化关系  $r$ 。此功能在 MR-GEN 中为用户提供一对候选对功能的基础上进行改进，使其能够为用户提供由特定组中 IO-CTF 组成的候选对。

(5) 将输出变化关系  $r_f$  与输入变化关系  $r$  结合构成蜕变关系。

(6) 控制生成蜕变关系的数量。

一个对象当中的蜕变关系有可能很多很多，得到全部的蜕变关系是一件困难



的事情，而且在现实情况中不一定具有执行所有根据蜕变关系生成的测试用例的条件，所以控制生成蜕变关系的数量是工具中不可缺少的功能。

用例图如图 4-1 所示：

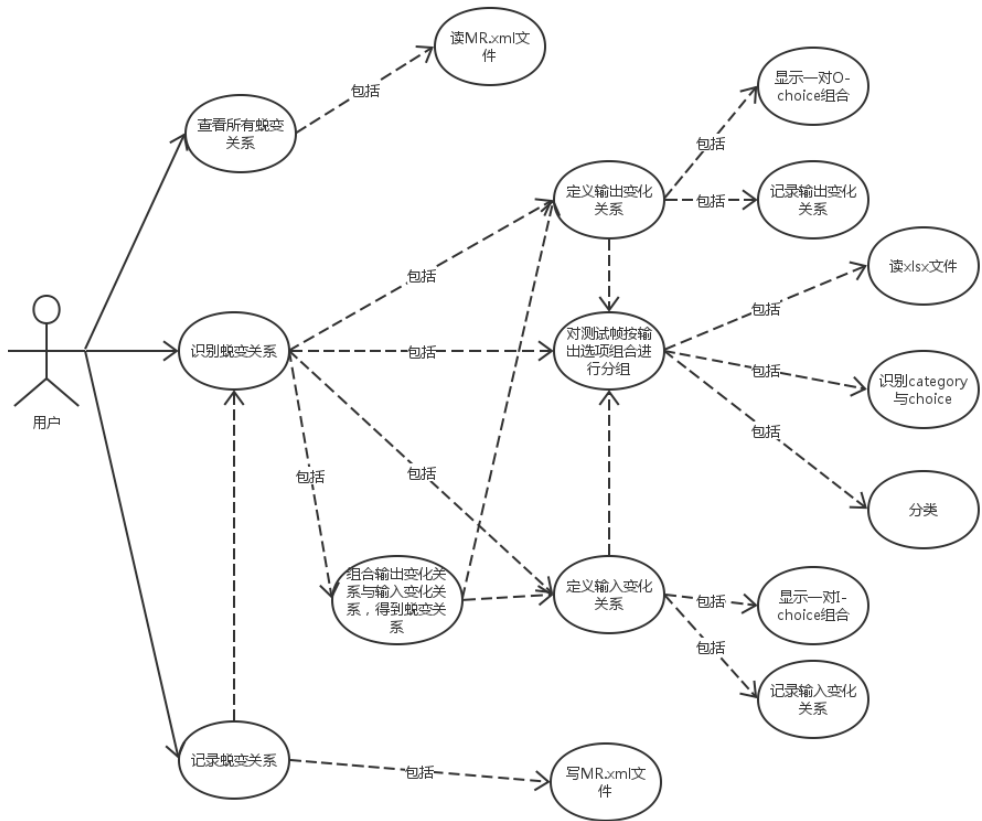


图 4-1 需求分析用例图

用户需求的三大功能为查看所有蜕变关系、识别蜕变关系和记录蜕变关系，下面将详细介绍每个功能包括的子功能。

查看所有蜕变关系包括对记录蜕变关系 MR.xml 文件读取的子功能。

- 读取 MR.xml 文件的功能为对存储蜕变关系的 MR.xml 文件进行读取操作，获得存储在文件内的蜕变关系。

识别蜕变关系包括对 IO-CTF 按输出选项组合进行分组、定义输出变化关系、定义输入变化关系与组合输出变化关系与输入变化关系得到蜕变关系。

- 对 IO-CTF 按输出选项组合进行分组功能的子功能包括读取 xlsx 文件、识别范畴与选项和分类功能。
- 定义输出变化关系功能的子功能包括显示候选组的 O-choice 组合与记录输出变化关系。

- 定义输入变化关系功能的子功能包括显示一个候选对的 I-choice 组合与记录输入变化关系。
- 组合输出变化关系与输入变化关系得到蜕变关系这一功能依赖于定义输入变化关系与输出变化关系，原因是蜕变关系由输入变化关系和输出变化关系构成。

记录蜕变关系功能依赖于识别蜕变关系功能，其子功能包括将识别的蜕变关系写入 MR.xml 文件中。

- 写 MR.xml 功能为对将识别到的蜕变关系写入 MR.xml 文件，存储蜕变关系。

## 4.2 总体设计

本节详细介绍 METRIC\*的支持工具 MR-GEN 的系统结构设计部分。

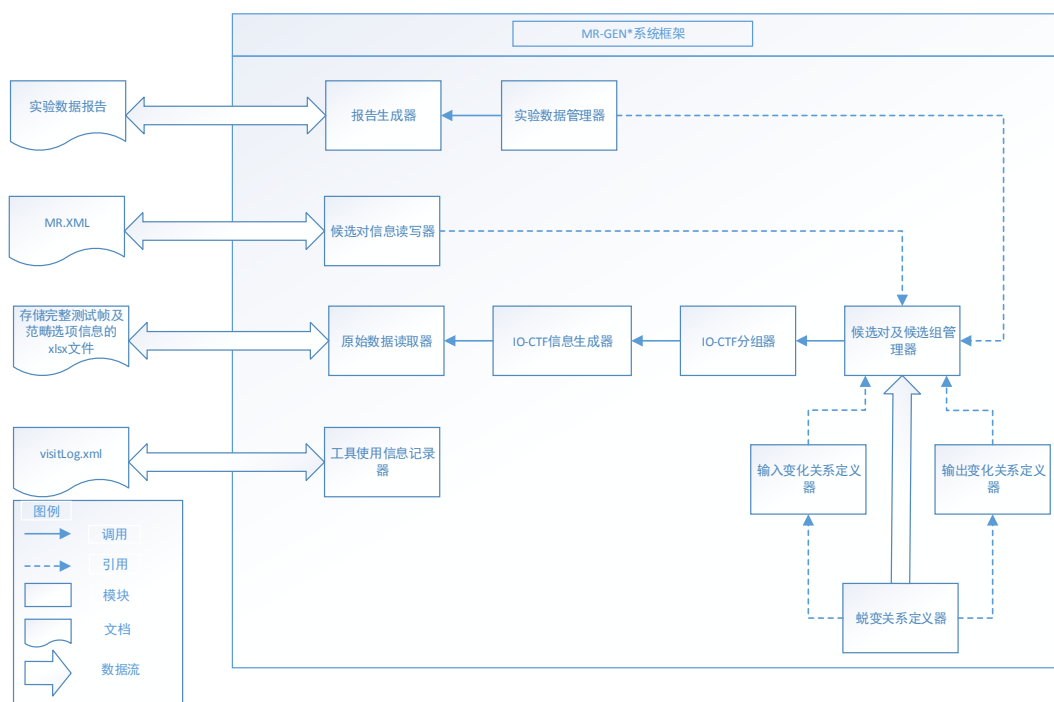
图 4-2 为 MR-GEN\*的系统架构图。该系统首先通过原始数据读取器读取存储完整测试帧及范畴选项信息的 xlsx。然后 IO-CTF 信息生成器根据读取到的信息生成所有 IO-CTF 及相关信息。接下来 IO-CTF 分组器将所有的 IO-CTF 按照输出选项组合进行分组，即 O-choice 组合相同的 IO-CTF 归为一组。候选对及候选组管理器负责管理所有候选对及候选组的信息。输出变化关系定义器依据候选组中 O-choice 组合的信息让用户来定义输出变化关系。输入变化关系定义器根据候选对中 I-choice 组合的信息让用户来定义输入变化关系。蜕变关系定义器根据之前定义的输入变化关系与输出变化关系来定义蜕变关系并将其返回到候选对与候选组管理器中，候选对信息读写器将新的信息记录进 MR.XML 中。蜕变关系定义完成后，实验数据管理器将输出蜕变关系过程中记录的数据，工具使用信息记录器将会记录用户使用工具的具体时间。

各模块的功能描述如下：

- 原始数据读取器实现的功能是对存储完整测试帧及范畴选项信息的 xlsx 文件读取，获取文件中描述 IO-CTF 及范畴和选项划分的原始数据。
- IO-CTF 信息生成器实现的功能是根据原始数据读取器读取到的描述 IO-CTF 及范畴和选项划分的原始数据生成每个 IO-CTF 的信息，包括每个范畴中选项的标签及描述。
- IO-CTF 分组器实现的功能是根据 IO-CTF 信息生成器生成的信息，将所有 IO-CTF 按照 O-choice 组合进行分组。
- 候选对及候选组信息管理器实现的功能是根据 IO-CTF 分组信息生成所有的候选组与候选组中的候选对，接收蜕变关系定义器返回的蜕变关系

并保存至对应候选对中。

- 输出变化关系定义器实现的功能是引用候选对及候选组信息管理器中候选组的信息，为用户提供候选组 **O-choice** 组合的描述，记录用户定义的输出变化关系。
- 输入变化关系定义器实现的功能是引用候选对及候选组信息管理器中候选对的信息，为用户提供候选对 **I-choice** 组合的描述，记录用户定义的输入变化关系。
- 蜕变关系定义器调用输入变化关系器中的输入变化关系与输出变化关系器中的输出变化关系来合成蜕变关系，并将蜕变关系返回到候选对及候选组管理器。
- 候选对信息读写器实现的功能是将候选对及候选组管理器中的候选对及候选组信息写入 **MR.xml** 文件中。
- 实验数据管理器实现的功能是调用候选对及候选组信息管理器中所有候选对与候选组的信息并生成实验数据报告，调用报告生成器将实验数据写入文件中。
- 报告生成器的功能是将实验数据报告写入文件中。



**图 4-2 MR-GEN\*系统架构图**

## 4.3 详细设计

本节介绍 METRIC\*相关支持工具 MR-GEN\*实现过程的细节及关键问题。

### 4.3.1 metric\_GUI 包

metric\_GUI 包是实现用户界面的包，包含工具的各个人机交互界面。主要功能是负责接收用户的输入，并显示工具的输出，与其他包协作实现工具的功能。

- InputSelectGUI 类实现 InputSelectGUI 窗体，该窗体让用户选择一个存储 IO-CTF 的 xlsx 文件，供工具读取其中的范畴与选项的描述及所有的 IO-CTF。具体功能：通过按钮触发 JFileChooser，让用户选择 xlsx 文件后返回该文件的绝对路径；通过另外一个按钮跳转到 OptionGUI。
- OptionGUI 类实现 OptionGUI 窗体，该窗体接收用户输入的需要生成蜕变关系的数量。通过 Start 按钮跳转到 OutputRelationDefGUI，开始定义输出变化关系。具体功能：通过 JTextField 让用户输入需要生成蜕变关系的数目，通过按钮跳转到 OutputRelationDefGUI 进行输出变化关系定义。
- OutputRelationDefGUI 类实现 OutputRelationDefGUI 窗体。该窗体为用户提供两个 IO-CTF 组，显示两个组在 O-choice 组合上区别；让用户输入这两个组在输出上存在的变化关系，记录至 MR.xml 文件中。在该窗体内重复上述过程直到所有组与其他所有组都进行过比较或者定义了输出变化关系的候选对的数量达到了需要生成蜕变关系的数目。具体功能：通过为 JPanel 添加内容为 O-choice 的 JLabel 来显示两个 IO-CTF 组的输出，并显示 O-choice 的差别；提供一个 JTextArea 以使用户输入变化关系；通过不同的按钮实现保存变化关系、判断下一对、回到前一对及进入输入变化关系定义界面这几个功能。
- InputRelationDefGUI 类实现 InputRelationDefGUI 窗体。该窗体为用户提供一个候选对（两个完整测试帧），显示两个完整测试帧在 I-choice 组合上的区别；让用户输入这两个完整测试帧在输入上存在的变化关系，记录至 MR.xml 文件中。在该窗体内重复上述过程直到所有存在输出变化关系的候选对被耗尽。具体功能，通过为 JPanel 添加内容为 O-choice 的 JLabel 来显示两个 IO-CTF 组的输出，并显示 O-choice 的差别；提供一个 JTextArea 以使用户输入变化关系；通过不同的按钮实现保存变化关系、判断下一对、回到前一对、显示已识别的蜕变关系及退出这几个功能。
- PairInfoGUI 类实现 PairInfoGUI 窗体。该窗体为用户显示一个候选对所

包含的信息，包括是否存在蜕变关系、创建与修改时间及蜕变关系。

- DisplayInfoGUI 类实现 DisplayInfoGUI 窗体。该窗体通过添加多个 PairInfoGUI 为用户显示所有候选对的信息。

### 4.3.2 business 包

business 包是实现工具全部业务逻辑的包，包含工具全部业务功能。主要功能是处理 metric\_GUI 包中相关界面获取的用户输入数据及 dataaccess 包读入的完整测试帧，完成完整测试帧初始信息的生成、完整测试帧分组、候选对信息管理及实验数据管理四大功能。

#### (1) InfoInitializer 类

InfoInitializer 类包含完整测试帧初始信息的生成的相关方法，实现完整测试帧初始信息的生成功能。主要方法如下：

- InfoInitializer(File file)是 InfoInitializer 类的构造方法，该方法识别输入范畴和选项与输出范畴和选项，并构建一个包含所有完整测试帧的 ArrayList；
- getTestFrameNum()返回所有完整测试帧的数量；
- getInputCatNum()返回所有输入范畴的数量；
- getOutputCatNum()返回所有输出范畴的数量；
- getAllChNameOfOneInputCat(int catIn)根据输入范畴 ID 返回对应范畴下所有输入选项的名字；
- getAllChNameOfOneOutputCat(int catIn)根据输出范畴 ID 返回对应范畴下所有输出选项的名字；
- getOneChNameOfOneInputCat(int catIn, String chTag)根据输入范畴 ID 及选项选项标签返回对应选项的名字；
- getOneChNameOfOneOutputCat(int catIn, String chTag)根据输出范畴 ID 及选项标签返回对应选项的名字；
- getAllTestFrames()返回所有完整测试帧；

#### (2) IOCTFGroupManager 类

IOCTFGroupManager 类包含完整测试帧分组的相关方法，实现完整测试帧分组功能，主要方法如下：

- DivideTestFramesIntoGroups (InfoInitializer infoInit)根据 infoInit 中完整测试帧的信息将完整测试帧按 O-choice 组合进行分组。

- `getAllGroupInformation()`返回所有分组信息;
- `getOneGroupByID(int id)`根据组 ID 返回对应的组;
- `getGroupNumber()`返回所有组的数量;
- `getOneGroupByGroupName(String name)`根据组名称返回对应的组。

### (3) AllPairsInfoManager 类

AllPairsInfoManager 类包含候选对信息管理的相关方法, 实现候选对信息管理功能, 主要方法如下:

- `getInfoOfPairsFromDifferentGroups()`返回所有由来自不同 IO-CTF 的组测试帧构成的候选对的信息;
- `getInfoOfPairsFromSameGroups()`返回所有由来自相同 IO-CTF 组的测试帧构成的候选对的信息;
- `judgeDiffGroupOrSameGroup(String pairname)`根据候选对名字判断构成候选对的两个测试帧是否属于同一 IO-CTF 组;
- `getNamesOfGroupPairsWithOutputRelation()`返回定义了输入变化关系的候选组的名称;
- `getNamesOfAllGroupPairs()`返回所有候选组的名称;
- `getPairNamesOfOneGroupPair(String grouppairname)`根据候选组的名称返回此候选组中所有候选对的名字;
- `getNamesOfPairsWithOutputRelation(ArrayList<String> grouppairnames)`返回所有定义了输出变化关系的候选对;
- `getOutputRelationOfOneGroupPair(String grouppairname)`根据候选组名字返回该组的输出变化关系;

### (4) ExprResultsManager 类

ExprResultsManager 类包含实验数据管理相关方法, 实现实验数据管理功能, 主要方法如下所示:

- `updateStartTimeLog(String startTime)`向 VisitLog.xml 文件更新开始时间;
- `updateEndTimeLog(String endTime)`向 VisitLog.xml 文件更新结束时间;
- `genMRReport(String reportDir)`生成 MR 报告;
- `genVisitLogReport(String reportDir)`生成 VisitLog 报告;

### 4.3.3 dataaccess 包

dataaccess 包是工具访问外部数据的基础，包含全部数据读写方法。主要功能是读取存储范畴和选项描述与所有完整测试帧的 xlsx 文件、将工具得到的候选对及蜕变关系记录到 MR.xml 文件中、将实验数据记录至 VisitLog.xml 及输出报告。

#### (1) MRXMLOperator 类

MRXMLOperator 类包含对 MR.xml 进行读写的方法，实现将工具得到的候选对及蜕变关系记录到 MR.xml 文件中的功能。主要方法如下所示：

- createPairInfoFileNew(ArrayList<ArrayList<PairInformation>>initInfoOfPairsFromDifferentGroups, ArrayList<ArrayList<PairInformation>>initInfoOfPairsFromSameGroups, String exprDir)创建新的候选对信息并写入 MR.xml 文件；
- updatePairInfoFileNew(PairInformation newPairInfo, String exprDir)更新候选对信息并写入 MR.xml 文件；
- readInAllPairsInfoNew(String exprDir) 从 MR.xml 文件中读取候选对信息；
- checkFileExistence(String exprDir)检查 MR.xml 是否存在；

#### (2) SourceDataReader 类

SourceDataReader 类包含对存储范畴和选项描述与所有完整测试帧的 xlsx 文件的读取方法。主要方法如下所示：

- getAllCategories(File f)返回所有范畴；
- getAllInputCategories(File f)返回所有输入范畴；
- getAllOutputCategories(File f)返回所有输出范畴；
- getAllRawTestFrames(File f)返回所有未处理的测试帧；
- read(XSSFSSheet sheet)读 xlsx 表的一页。

#### (3) VisitXMLOperator 类

VisitXMLOperator 类包含对 VisitLog.xml 文件的读写方法，实现工具使用时间的记录。主要方法如下所示：

- updateStartTime(String startTime, String exprDir)更新开始时间；
- updateEndTime(String endTime, String exprDir)更新结束时间；
- createStartTimeElem(Document doc, String starTime)创建开始时间节

点;

- `checkFileExistence(String exprDir)`检查 VisitLog.xml 文件是否存在;

#### (4) ReportPrinter 类

ReportPrinter 类包含报告生成的若干方法,实现蜕变关系生成完成后相关报告生成的功能。主要方法如下所示:

- `createMRReport(String reportName, String reportDir, String exprDir)`生成蜕变关系报告;
- `createVisitLogReport(String reportDir, String exprDir)`生成访问时间报告;

### 4.3.4 entity 包

entity 包含有工具用到的所有对象的定义。

#### (1) CatWithChoices 类

CatWithChoices 类用来表示范畴和此范畴下所有选项。属性 `catTag` 表示范畴的标签, `catName` 表示范畴的名称, `choiceTags` 表示选项的标签, `choiceNames` 表示选项的名称。类中的方法如下所示:

- `getCatTag()`返回当前对象所表示范畴的标签;
- `getCatName()`返回当前对象所表示范畴的名称;
- `getAllChoiceTagsAndNames()`返回当前对象所表示范畴下所有选项的名称和标签;
- `getChoiceNameByTag(String chTag)`根据 `chTag` 标签返回对应的选项的名称;

#### (2) TestFrame 类

TestFrame 类用来表示完整测试帧。属性 `inputChoiceValues` 表示完整测试帧的输入选项, `outputChoiceValues` 表示完整测试帧的输出选项。类中的方法如下所示:

- `getInputChoiceNum()`返回输入选项的数目;
- `getOutputChoiceNum()`返回输出选项的数目;
- `getAllInputChoiceValues()`返回所有输入选项的值;
- `getAllOutputChoiceValues()`返回所有输出选项的值;
- `getOneInputChoiceValue(int index)`根据输入选项 ID 返回对应的选项值;



- `getOneOutputChoiceValue(int index)`根据输出选项 ID 返回对应的选项值。

### (3) PairInformation 类

PairInformation 类用来表示候选对信息。属性 `pairName` 表示候选对名称, `type` 表示候选对类型, `groupNameOfTestFrame1` 表示第一个完整测试帧所属 IO-CTF 组的名称, `groupNameOfTestFrame2` 表示第二个完整测试帧所属 IO-CTF 组的名称, `hasMR` 表示此候选对是否有蜕变关系, `inputRelationDefinition` 表示候选对输入变化关系, `outputRelationDefinition` 表示候选对输出变化关系, `mrDefinition` 表示蜕变关系定义, `createdTime` 表示候选对创建时间, `lastModifiedTime` 表示最后一次修改时间。类的方法如下所示:

- `getPairName()`返回候选对名称;
- `getTf1Name()`返回第一个测试帧的名称;
- `getTf1ID()`返回第一个测试帧的 ID;
- `getTf2ID()`返回第二个测试帧的 ID;
- `getTf2Name()`返回第二个测试帧的名称;
- `getGroupNameOfTestFrame1()`返回第一个测试帧所属 IO-CTF 组的名称;
- `getGroupNameOfTestFrame2()`返回第二个测试帧所属 IO-CTF 组的名称;
- `getType()`返回候选对类型;
- `getHasMRInfo()`返回候选对是否有蜕变关系;
- `getInputRelationDef()`返回候选对的输入变化关系;
- `getOutputRelationDef()`返回候选对的输出变化关系;
- `getMRDefinition()`返回候选对的蜕变关系;
- `setNewHasMRInfo(String newInfo)`设定候选对是否有蜕变关系;
- `setNewInputRelationDef(String newInputRelationDef)`设定新的输入变化关系;
- `setNewOutputRelationDef(String newOutputRelationDef)`设定新的输出变化关系;
- `setNewMRDefinition(String newInfo)`设定新的蜕变关系;
- `setNewCreatedTime(String newInfo)`设定新的创建时间;
- `setNewModifiedTime(String newInfo)`设定新的修改时间。

#### (4) GroupInformation 类

GroupInformation 类表示 IO-CTF 分组信息。属性 groupName 表示 IO-CTF 组的组名，testFramesBelongToTheGroup 表示属于当前 IO-CTF 的完整测试帧集合。类的方法如下所示：

- groupName()返回当前组名称；
- groupId()返回当前组 ID；
- getTestFrameNum()返回属于当前组的完整测试帧的数目；
- getTestFrameByID(int id)根据完整测试帧 ID 返回完整测试帧；
- getOutputChoiceValuesOfGroup()返回当前组对应的输出选项值；

## 4.4 工具演示

结合 EXPwithIOCTF.xlsx 演示 MR-GEN\*的使用方法。该 xlsx 存储了实例研究中第三个实例费用补偿系统 EXP 的 IO-CTF 及范畴选项的描述。

打开工具，进入如图 4-3 所示的 Input file 窗口。该窗口的功能是让用户选择 xlsx 文件供工具读取。其中的文本框用来显示用户选择的 xlsx 文件的绝对路径。点击文本框右侧的“...”按钮会弹出文件打开窗口，让用户选择一个 xlsx 文件。下方的“Submit”按钮功能为让工具读取绝对路径为文本框中所示路径的 xlsx 文件。

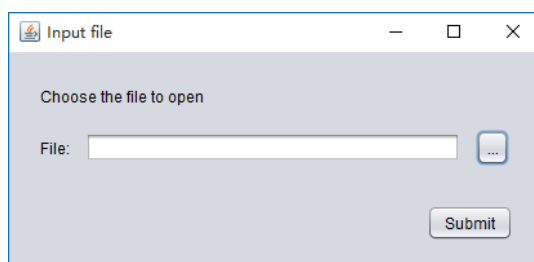


图 4-3 Input File 界面

点击“...”按钮，弹出如图 4-4 所示的打开文件窗口。该窗口为用户显示一系列文件并让用户选择需要工具读取的 xlsx 文件。

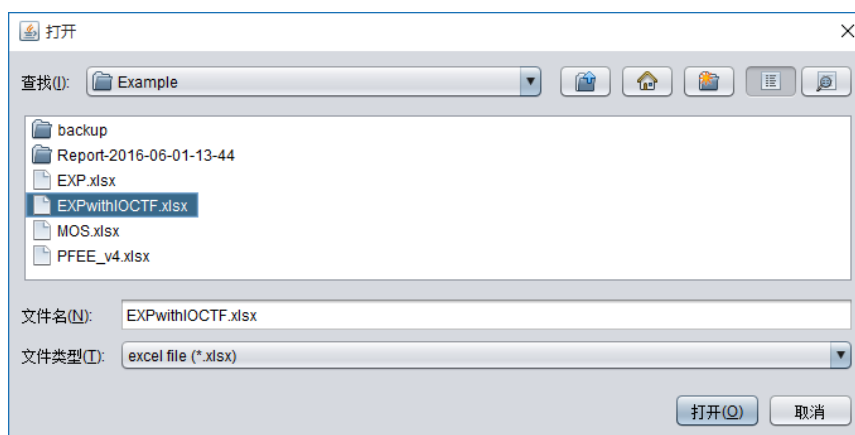


图 4-4 打开文件窗口

选择 EXPwithIOCTF.xlsx 文件并点击“打开”，回到 input file 窗口。此时的 Input file 窗口如图 4-5 所示：

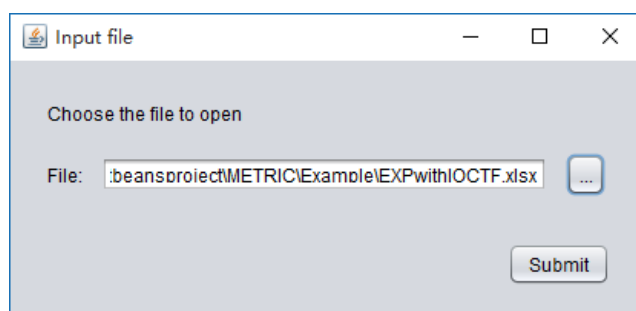


图 4-5 回到 Input File 窗口

文本框中显示出用户选择的 xlsx 文件的绝对路径。点击“Submit”按钮让工具对选择的 xlsx 文件读取，并进入如图 4-6 的 Option 窗口。

Option 窗口的功能是接收用户输入的需要生成蜕变关系的数量。在文本框中用户可以输入需要生成的蜕变关系的数目。“start”按钮则开始输出变化关系的定义。

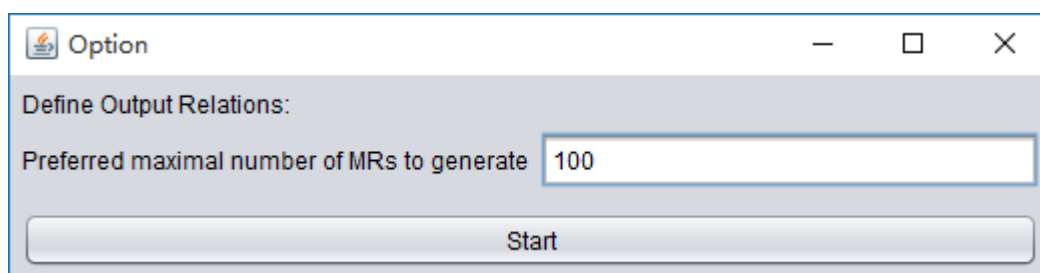


图 4-6 Option 窗口

在文本框中输入数字 100 为例，点击“Start”按钮，进入如图 4-7 所示的输出变化关系定义窗口，开始输出变化关系的定义。

Output Relation Define 窗体的功能是为用户显示一个对比组中的两个 IO-CTF 组的输出选项组合信息、让用户选择是否能够从显示的输出选项组合信息中得到输出变化关系、提供文本框供用户输入关系、显示当前的候选组判断进度、保存输出变化关系等功能。

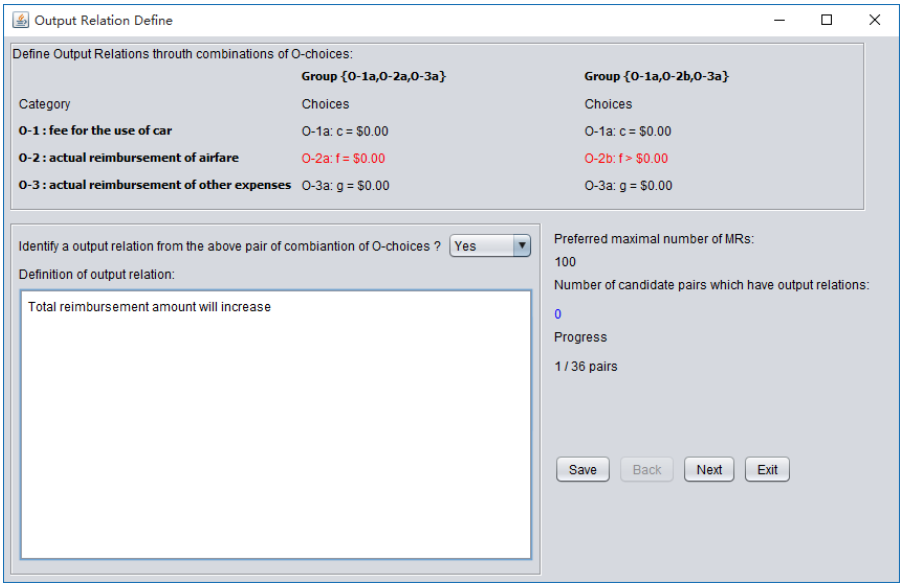


图 4-7 Output Relation Define 窗口

窗体上方的框体中显示了两个 IO-CTF 组的输出选项，如果可以通过两个 O-choice 组合得到输出的变化关系，那么可以在组合框选择“YES”并在下方的文本框填写输出变化关系。然后点击“Save”按钮可以保存当前定义的输出变化关系，记录成功后会弹出如图 4-8 所示的消息框提醒用户。点击“Next”按钮可以切换到下一个候选组进行输入关系对比。点击“Back”按钮可以切换前一个候选组。

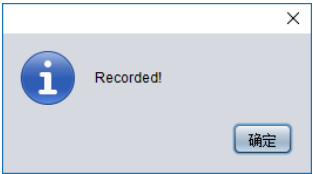


图 4-8 Recorded 消息框

若不能得到输出变化关系，则选择组合框的“NO”并点击“save”按钮。工具会显示新的候选组输出选项并让用户判断输出变化关系。

若存在输出变化关系的候选对的数目超过了需要定义的蜕变关系数目，则工具会弹出如图 4-9 所示的确认对话框，提醒用户是否继续。

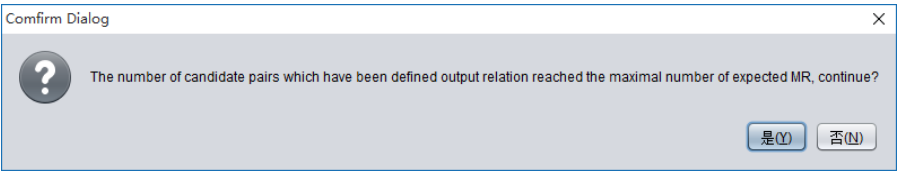


图 4-9 Comfirm Dialog 确认对话框

点击是则继续进行输出变化关系定义，点击否则会提示输出变化关系定回到输出变化关系定义窗口。

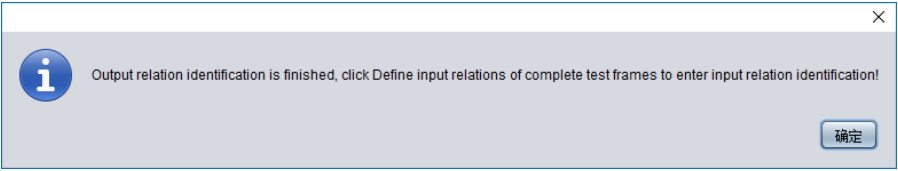


图 4-10 Comfirm Dialog 消息框

当存在输出变化关系的候选对的数目达到了需要生成的蜕变关系数目时，工具会弹出一个如图 4-10 的消息框提醒用户。点击确认后输出变化关系定义界面会出现一个如图 4-11 所示的新的按钮“Define input relations of complete test frames”。点击此按钮将进入输入变化关系定义窗口。

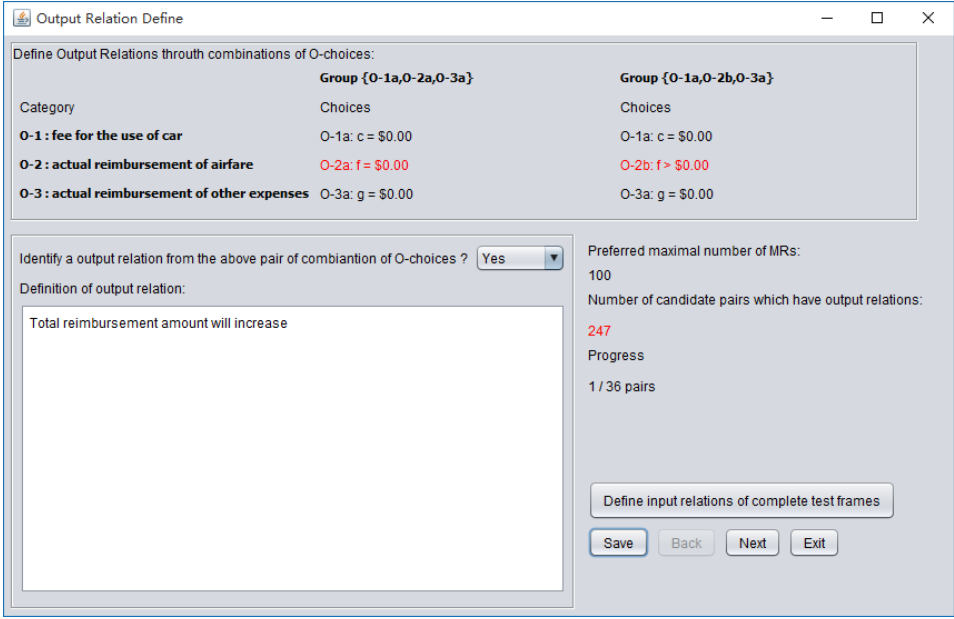


图 4-11 回到 Output Relation Definition 窗口

点击“Define input relations of complete test frames”按钮进入输入变化关系定义窗口，如图 4-12 所示：

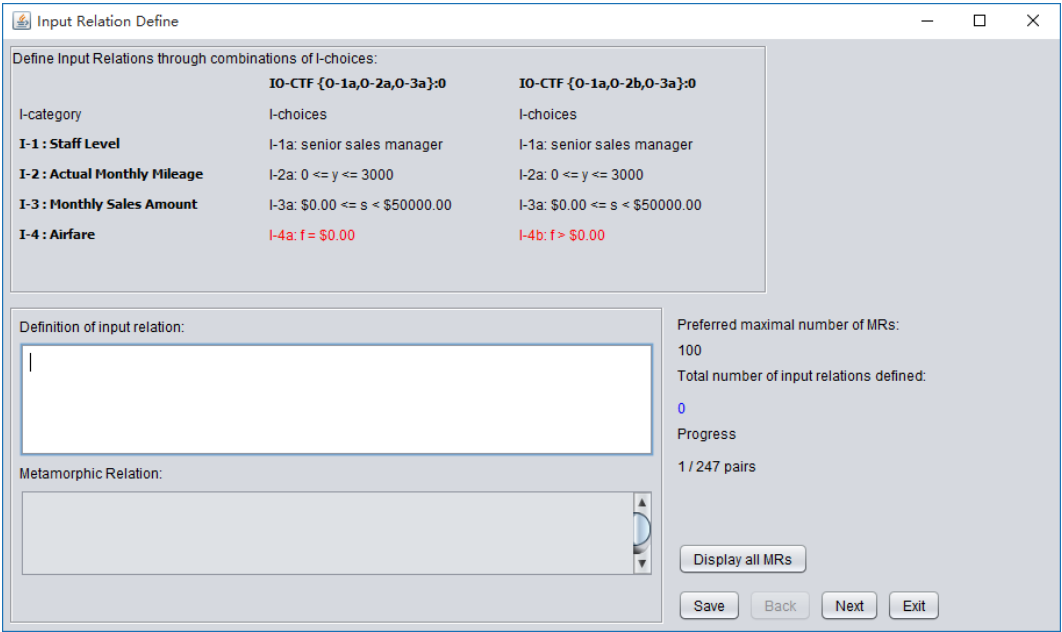


图 4-12 Input Relation Definition 窗口 1

可以在窗口上方的框体中查看候选对中两个 IO-CTF 的输入选项信息，如果可以通过两个 I-choice 组合得到输出的变化关系，那么可以下方的文本框填写输出变化关系，然后点击“Save”按钮保存所定义的输入变化关系。该候选对的蜕变关系会根据输入变化关系与输出变化关系组合得到，并显示在最下面的文本框中，如图 4-13 所示：

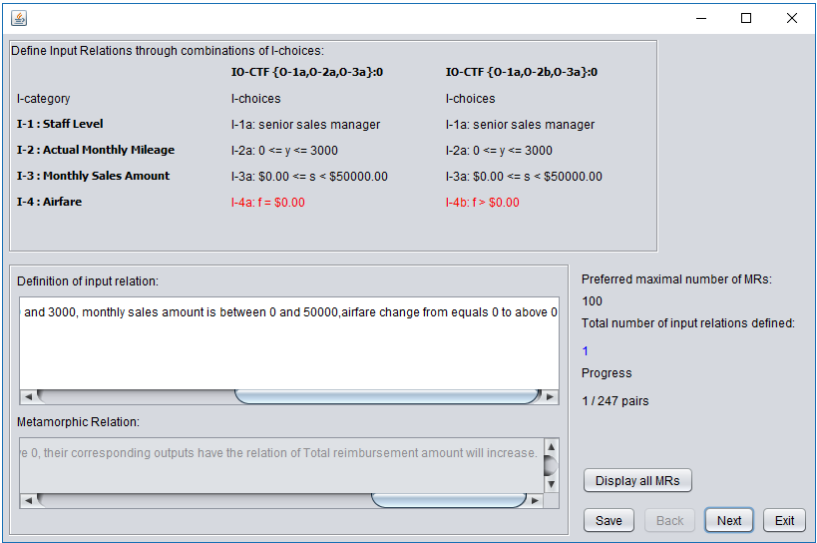


图 4-13 Input Relation Definition 窗口 2

点击“**Next**”按钮可以继续进行下一个候选对的输入关系定义，点击“**Back**”按钮可以返回到上一个候选对，可以查看定义的信息并进行修改。完成所有候选对的判断后点击“**Exit**”即可退出。

## 5 实验评估

本章对 METRIC\*与 METRIC 在蜕变关系识别上的差异进行了实验评估。分别使用 METRIC\*与 METRIC 对 4 个现实生活中的程序进行蜕变关系识别，分析两种方法的差异，对于上述的改进方案进行实验评估。

### 5.1 研究问题

实验评估以回答以下三个问题为目标：

**问题 1：METRIC\*能否识别蜕变关系？**

我们通过 METRIC\*应用于实验对象的成功与否来衡量；

**问题 2：在能够得出所有蜕变关系的情况下，METRIC\*相比于 METRIC 能否有效减少对无用候选对进行判断的情况？**

我们通过将 METRIC\*与 METRIC 需要判断的候选对的数量进行对比来衡量。

### 5.2 实验设计

#### 5.2.1 实验对象

实验对象为四个现实生活程序：联通计费服务、航空行李计费服务、费用补偿系统 EXP、订餐系统 MOS

#### 5.2.2 实验步骤

对四个实验对象使用 METIRC 进行蜕变关系识别，记录每个程序依据 METRIC 步骤所生成候选对及其数量。

对四个实验对象使用 METRIC\*进行蜕变关系识别，记录每个程序依据 METRIC\*步骤所生成的候选组及其数量，记录有用的候选组与数量及无用的候选组及数量。对于有用的候选组，记录生成的所有候选对及数量。

对于 METRIC 来说，要得出所有蜕变关系，需要将所有生成的候选对进行判断。故在能够得出所有蜕变关系的情况下，METRIC 需要判断的候选对的数目即为生成的所有候选对的数目。对完整测试帧进行对比的次数即为候选对的数目，原因是判断一个候选对即对比两个测试帧一次。



对于 METRIC\*来说, 要得出所有的蜕变关系, 首先需要对所有的候选组进行判断以得到候选组的输出关系。对于存在输出关系的候选组, 将完整测试帧两两结合成候选对并判断候选对的输入关系, 进而得到蜕变关系。对于不存在输出关系的候选组, 直接舍弃而不将测试帧组合为候选对。因此, 要得出所有的蜕变关系, 将存在输出关系的组所组合的候选对进行判断即可, 需要判断的候选对的数量即存在输出关系的组中完整测试帧两两结合形成的候选对的数量。

使用 METRIC\*识别蜕变关系时进行的选项组合的比较次数包含输出选项组合比较次数与输入选项组合比较次数。输出选项组合比较次数即输出选项组合进行对比的次数, 也就是对候选组进行判断的次数。原因是一个候选组包含两个完整测试帧组, 对一个候选组输出关系的判断即对此候选组中两个完整测试帧组对应的输出选项组合进行比较。输入选项组合比较次数即对存在输出关系的候选对进行判断的次数。故 METRIC\*识别蜕变关系时进行的选项组合的比较次数为存在输出关系的候选组数目加上存在输出关系的候选对数目。

5.3 实例研究一：联通计费服务

5.3.1 规格描述

联通计费服务根据用户的当月套餐、话费、流量及可视通话时间计算出用户的当月话费。

(1) 输入规格描述

输入规格描述如表 5-1 所示

表 5-1 输入规格描述

输入参数	参数类型
planType	String
planFee	int
talkTime	int
flow	int
callViewTime	Int

由于国内可视通话使用较少，系统中没有对可视电话费用进行计算。

(2) 输出规格描述

输出参数为 bill，类型为 double。其计算方法为：

$$bill = (talkTime - talkTimeBench) * talkTimePer + (flow - flowBench) * flowPer + planFee$$

其中 talkTime 为用户当月的通话时间，talkTimePer 是每分钟通话费用，flow 是用户当月所使用的流量，flowPer 是单位流量费用，talkTimeBench 和 flowBench 是套餐中赠送的通话时间和流量，planFee 是用户每月的套餐费用，具体如表 5-2 所示：

表 5-2 联通计费服务计费标准说明

planType	planFee	talkTimeBench	flowBench	talkTimePer	flowPer
A	46	50	150	0.25	0.3
	96	96	240	0.15	0.3
	286	286	900	0.15	0.3
	886	3000	3000	0.15	0.3
B	46	120	40	0.25	0.3
	96	450	80	0.15	0.3
	126	680	100	0.15	0.3
	186	1180	150	0.15	0.3

5.3.2 使用 METRIC 识别蜕变关系

METRIC 框架使用 CHOC’LATE 测试用例生成方法产生的完整测试帧并识别蜕变关系，故需要先生成测试对象的测试帧。

完整测试帧生成：

生成测试帧主要经历以下三个步骤：

1. 划分范畴和选项。

测试人员首先鉴别出对软件执行行为有影响的输入参数或环境条件。输入参数或环境条件被定义为范畴(category)。每一个范畴被进一步划分为不同的选项(choice)，选项代表着其所属范畴可能产生的不同情况。联通计费服务的范畴和选项划分表 5-3 所示：

表 5-3 联通计费服务范畴和选项划分

Categories	Associated Choices
planType	1a. A
	1b. B
planFee(F)	2a. 46
	2b. 96
	2c. 126
	2d. 186
	2e. 286
	2f. 886
talkTime(t)	3a. t <= talkTimeBench
	3b. t > talkTimeBench
flow(f)	4a. f < =flowBench
	4b. f >=flowBench

2. 确定每对选择之间的关系，并将关系记录至选择关系表，如表 5-4 所示：

表 5-4 联通计费服务选择关系表

	1a	1b	2a	2b	2c	2d	2e	2f	3a	3b	4a	4b
1a	□	∕	⊥	⊥	∕	∕	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥
1b	∕	□	⊥	⊥	⊥	⊥	∕	∕	⊥	⊥	⊥	⊥
2a	⊥	⊥	□	∕	∕	∕	∕	∕	⊥	⊥	⊥	⊥
2b	⊥	⊥	∕	□	∕	∕	∕	∕	⊥	⊥	⊥	⊥
2c	∕	⊥	∕	∕	□	∕	∕	∕	⊥	⊥	⊥	⊥
2d	∕	⊥	∕	∕	∕	□	∕	∕	⊥	⊥	⊥	⊥
2e	⊥	∕	∕	∕	∕	∕	□	∕	⊥	⊥	⊥	⊥
2f	⊥	∕	∕	∕	∕	∕	∕	□	⊥	⊥	⊥	⊥
3a	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	□	∕	⊥	⊥
3b	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	∕	□	⊥	⊥
4a	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	□	∕
4b	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	⊥	∕	□

### 3. 使用选择关系表生成完整测试帧。

完整测试帧是选择的集合，这个集合包含每个范畴其中的一个选项，即完整测试帧是通过在每个范畴选择一个选项再根据选择关系表中选择的关系进行组合得到的。

对于联通计费服务，一共有 4 个范畴、12 个选项，但这并不意味着有  $2*6*2*2=48$  个可能的完整测试帧，因为根据规格说明书可以得到一些选择的组合是无效的，即两个选择不能同时出现在一个完整测试帧中。举个例子来说，2c 和 1a 的关系是 2c/1a，即 2c 所在的测试帧当中一定不会出现 1a，那么类似于 {1a,2c,3a,4a} 的组合就是无效的。CHOC’LATE 提供了由选择关系表生成测试帧的算法。

所有的有效完整测试帧如表 5-5 所示：

表 5-5 联通计费服务完整测试帧

{1a,2a,3a,4a}	{1a,2a,3a,4b}	{1a,2a,3b,4a}	{1a,2a,3b,4b}
{1a,2b,3a,4a}	{1a,2b,3a,4b}	{1a,2b,3b,4a}	{1a,2b,3b,4b}
{1a,2e,3a,4a}	{1a,2e,3a,4b}	{1a,2e,3b,4a}	{1a,2e,3b,4b}
{1a,2f,3a,4a}	{1a,2f,3a,4b}	{1a,2f,3b,4a}	{1a,2f,3b,4b}
{1b,2a,3a,4a}	{1b,2a,3a,4b}	{1b,2a,3b,4a}	{1b,2a,3b,4b}
{1b,2b,3a,4a}	{1b,2b,3a,4b}	{1b,2b,3b,4a}	{1b,2b,3b,4b}
{1b,2c,3a,4a}	{1b,2c,3a,4b}	{1b,2c,3b,4a}	{1b,2c,3b,4b}
{1b,2d,3a,4a}	{1b,2d,3a,4b}	{1b,2d,3b,4a}	{1b,2d,3b,4b}

完整测试帧生成完毕后，将所有完整测试帧作为输入提供给 METRIC 的支持工具 MR-GEN 进行蜕变关系识别。

### 蜕变关系识别：

METRIC 蜕变关系识别框架包含以下三个步骤：

1. 选择两个相关且不同的完整测试帧作为软件测试人员识别蜕变关系的候选对。
2. 让软件测试人员判定选定的候选对(candidate pair)是否对蜕变关系识别有用，如果有用，则让软件测试人员对蜕变关系进行描述。
3. 重新从（1）步骤开始，重复整个过程直到所有候选对耗尽，或者预先设定好需要生成的蜕变关系的数量已经达到。

共生成 496 个候选对，如果要得到全部蜕变关系需要对全部 496 个候选对进行判断。

设第一个测试帧的输出用 bill 表示，第二个测试帧的输出用 bill\*表示，蜕变关系如表 5-6 所示（部分）：

表 5-6 联通计费服务蜕变关系（部分）

蜕变关系序号	r	r <sub>f</sub>
1	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2a,3a,4b}	bill*>bill
2	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2a,3b,4a}	bill*>bill
3	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2a,3b,4b}	bill*>bill
4	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2b,3a,4a}	bill*>bill
5	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2b,3a,4b}	bill*>bill
6	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2b,3b,4a}	bill*>bill
7	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2b,3b,4b}	bill*>bill
8	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2e,3a,4a}	bill*>bill
9	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2e,3a,4b}	bill*>bill
10	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2e,3b,4a}	bill*>bill
11	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2e,3b,4b}	bill*>bill
12	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2f,3a,4a}	bill*>bill
13	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2f,3a,4b}	bill*>bill
14	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2f,3b,4a}	bill*>bill
15	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2f,3b,4b}	bill*>bill
16	{1a,2a,3a,4a} -> {1b,2a,3a,4a}	bill*= bill
17	{1a,2a,3a,4a} -> {1b,2a,3a,4b}	bill*>bill
18	{1a,2a,3a,4a} -> {1b,2a,3b,4a}	bill*>bill
19	{1a,2a,3a,4a} -> {1b,2a,3b,4b}	bill*>bill

### 5.3.3 使用 METRIC\*识别蜕变关系

METRIC\* 使用了包含输入范畴(I-category)和选项(I-choice)与输出范畴(O-

category)和选项(O-choice)的测试帧识别蜕变关系。需要首先使用 CHOC’LATE-DIP 生成包含输入输出的测试帧。

**完整测试帧生成：**

生成测试帧主要经历以下三个步骤：

1. 划分范畴和选项。

测试人员不仅需要鉴别出对软件执行行为有影响的输入参数或环境条件并定义范畴和选项，还需要鉴别出程序不同的输出情景并定义范畴和选项。联通计费服务的范畴和选项划分如表 5-7 和表 5-8 所示：O-categoriy 包含两部分，第一个是当月话费是否超过套餐费用，第二个是对套餐费用具体价格的描述。

**表 5-7 输入的范畴选项划分**

I-Categories	I-choices
I-1. planType	I-1a. A
	I-1b. B
I-2. planFee(F)	I-2a. 46
	I-2b. 96
	I-2c. 126
	I-2d. 186
	I-2e. 286
	I-2f. 886
I-3. talkTime(t)	I-3a. $t \leq \text{talkTimeBench}$
	I-3b. $t > \text{talkTimeBench}$
I-4. flow(f)	I-4a. $f \leq \text{flowBench}$
	I-4b. $f > \text{flowBench}$

**表 5-8 输出的范畴选项划分**

Output	O-categories	O-choices
bill	O-1. overcharge or not(B)	O-1a. $B = F$
		O-1b. $B > F$
	O-2. planFee(F)	O-2a. $F = 46$
		O-2b. $F = 96$
		O-2c. $F = 126$
		O-2d. $F = 186$
		O-2e. $F = 286$
		O-2f. $F = 886$

2. 建立同时包含 I-choice 和 O-choice 的选择关系表，并且将选择之间的关系记录进入选择关系表中，如表 5-9 所示：

5-9 扩展的选择关系表

		I-choices												O-choices	
		I-1a	I-1b	I-2a	I-2b	I-2c	I-2d	I-2e	I-2f	I-3a	I-3b	I-4a	I-4b	O-1a	O-1b
I-choices	I-1a	☐	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
	I-1b	☑	☐	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
	I-2a	☑	☑	☐	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
	I-2b	☑	☑	☑	☐	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
	I-2c	☑	☑	☑	☑	☐	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
	I-2d	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
	I-2e	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
	I-2f	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☑	☑	☑	☑	☑	☑
	I-3a	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☑	☑	☑	☑	☑
	I-3b	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☑	☑	☐	☑
	I-4a	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☑	☑	☑
	I-4b	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☐	☑
O-choices	O-1a	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☑
	O-1b	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☐	☑	☐	☑	☑	☐

3. 使用扩展的选择关系表生成完整测试帧。

所有的完整测试帧如表 5-10 所示：

表 5-10 联通计费服务 IO-CTF

{ I-1a, I-2a, I-3a, I-4a; O-1a, O-2a }	{ I-1a, I-2a, I-3a, I-4b; O-1b, O-2a }	{ I-1a, I-2a, I-3b, I-4a; O-1b, O-2a }
{ I-1a, I-2a, I-3b, I-4b; O-1b, O-2a }	{ I-1a, I-2b, I-3a, I-4a; O-1a, O-2b }	{ I-1a, I-2b, I-3a, I-4b; O-1b, O-2b }
{ I-1a, I-2b, I-3b, I-4a; O-1b, O-2b }	{ I-1a, I-2b, I-3b, I-4b; O-1b, O-2b }	{ I-1a, I-2e, I-3a, I-4a; O-1a, O-2e }
{ I-1a, I-2e, I-3a, I-4b; O-1b, O-2e }	{ I-1a, I-2e, I-3b, I-4a; O-1b, O-2e }	{ I-1a, I-2e, I-3b, I-4b; O-1b, O-2e }
{ I-1a, I-2f, I-3a, I-4a; O-1a, O-2f }	{ I-1a, I-2f, I-3a, I-4b; O-1b, O-2f }	{ I-1a, I-2f, I-3b, I-4a; O-1b, O-2f }
{ I-1a, I-2f, I-3b, I-4b; O-1b, O-2f }	{ I-1b, I-2a, I-3a, I-4a; O-1a, O-2a }	{ I-1b, I-2a, I-3a, I-4b; O-1b, O-2a }
{ I-1b, I-2a, I-3b, I-4a; O-1b, O-2a }	{ I-1b, I-2a, I-3b, I-4b; O-1b, O-2a }	{ I-1b, I-2b, I-3a, I-4a; O-1a, O-2b }
{ I-1b, I-2b, I-3a, I-4b; O-1b, O-2b }	{ I-1b, I-2b, I-3b, I-4a; O-1b, O-2b }	{ I-1b, I-2b, I-3b, I-4b; O-1b, O-2b }
{ I-1b, I-2c, I-3a, I-4a; O-1a, O-2c }	{ I-1b, I-2c, I-3a, I-4b; O-1b, O-2c }	{ I-1b, I-2c, I-3b, I-4a; O-1b, O-2c }
{ I-1b, I-2c, I-3b, I-4b; O-1b, O-2c }	{ I-1b, I-2d, I-3a, I-4a; O-1a, O-2d }	{ I-1b, I-2d, I-3a, I-4b; O-1b, O-2d }
{ I-1b, I-2d, I-3b, I-4a; O-1b, O-2d }	{ I-1b, I-2d, I-3b, I-4b; O-1b, O-2d }	

测试帧生成完毕后，按照 METRIC\*方法的步骤，我们将对联通计费服务进行蜕变关系识别。

蜕变关系识别：

按 O-choice 将测试帧归类，具有相同 O-choice 组合的测试帧归为一组。如

表 5-11 所示：

表 5-11 IO-CTF 分类

Combination of O-choices	IO-CTF	
{ O-1a, O-2a}	{ l-1a, l-2a, l-3a, l-4a;O-1a,O-2a}	{ l-1b, l-2a, l-3a, l-4a;O-1a,O-2a}
{ O-1a, O-2b}	{ l-1a, l-2b, l-3a, l-4a;O-1a,O-2b}	{ l-1b, l-2b, l-3a, l-4a;O-1a,O-2b}
{ O-1a, O-2c}	{ l-1b, l-2c, l-3a, l-4a;O-1a,O-2c}	
{ O-1a, O-2d}	{ l-1b, l-2d, l-3a, l-4a;O-1a,O-2d}	
{ O-1a, O-2e}	{ l-1a, l-2e, l-3a, l-4a;O-1a,O-2e}	
{ O-1a, O-2f}	{ l-1a, l-2f, l-3a, l-4a;O-1a,O-2f}	
{ O-1b, O-2a}	{ l-1a, l-2a, l-3a, l-4b;O-1b,O-2a}	{ l-1b, l-2a, l-3a, l-4b;O-1b,O-2a}
	{ l-1a, l-2a, l-3b, l-4a;O-1b,O-2a}	{ l-1b, l-2a, l-3b, l-4a;O-1b,O-2a}
	{ l-1a, l-2a, l-3b, l-4b;O-1b,O-2a}	{ l-1b, l-2a, l-3b, l-4b;O-1b,O-2a}
{ O-1b, O-2b}	{ l-1a, l-2b, l-3a, l-4b;O-1b,O-2b}	{ l-1b, l-2b, l-3a, l-4b;O-1b,O-2b}
	{ l-1a, l-2b, l-3b, l-4a;O-1b,O-2b}	{ l-1b, l-2b, l-3b, l-4a;O-1b,O-2b}
	{ l-1a, l-2b, l-3b, l-4b;O-1b,O-2b}	{ l-1b, l-2b, l-3b, l-4b;O-1b,O-2b}
{ O-1b, O-2c}	{ l-1b, l-2c, l-3a, l-4b;O-1b,O-2c}	{ l-1b, l-2c, l-3b, l-4b;O-1b,O-2c}
	{ l-1b, l-2c, l-3b, l-4a;O-1b,O-2c}	
{ O-1b, O-2d}	{ l-1b, l-2d, l-3a, l-4b;O-1b,O-2d}	{ l-1b, l-2d, l-3b, l-4b;O-1b,O-2d}
	{ l-1b, l-2d, l-3b, l-4a;O-1b,O-2d}	
{ O-1b, O-2e}	{ l-1a, l-2e, l-3a, l-4b;O-1b,O-2e}	{ l-1a, l-2e, l-3b, l-4b;O-1b,O-2e}
	{ l-1a, l-2e, l-3b, l-4a;O-1b,O-2e}	
{ O-1b, O-2f}	{ l-1a, l-2f, l-3a, l-4b;O-1b,O-2f}	{ l-1a, l-2f, l-3b, l-4b;O-1b,O-2f}
	{ l-1a, l-2f, l-3b, l-4a;O-1b,O-2f}	

检查同组内的每对不同测试帧，得到如何从一个 l-choice 组合到另一个 l-choice 组合的变换关系。即可得到一个蜕变关系：当某一 l-choice 组合变换到另一 l-choice 组合，输出依然在 同一 O-choice 组合内。

对于两个不同组，检查两组对应的 O-choice 组合是否存在某种关系  $r_f$ ，检查该两组间的每对不同完整测试帧，得到如何从一个 l-choice 组合到另一个 l-choice 组合的变换关系，即可得到一个蜕变关系：当某一 l-choice 组合变换到另一 l-choice 组合，输出存在关系  $r_f$ 。根据以上思路，对联通计费服务做蜕变关系识别。

1. 同组内蜕变关系识别

举例：

对于{O-1a,O-2a}组，O-choice 组合的意义为：当月话费（bill）等于套餐费用（planFee）且套餐费用等于 46。组内某一 l-choice 组合变换到另一 l-choice 组合，输出依然在 同一 O-choice 组合内，我们可以得到输出的变化关系  $r_f$ ：当月话费不变化（ $bill^* = bill$ ）。将组内两个完整测试帧（记为 IO-CTF<sub>1</sub> 和 IO-CTP<sub>2</sub>）的输入进行对比，可以得到关系 r：套餐费用为 46，当月通话时长



不超过套餐内规定时长，当月流量不超过套餐内流量，套餐由 A 改为 B。将  $r$  与  $r_f$  结合即可得到以下蜕变关系：在套餐费用为 46、当月通话时长不超过套餐内规定时长、当月流量不超过套餐内流量、套餐由 A 改为 B 的情况下，套餐费用不变。用完整测试帧表示如表 5-12：

表 5-12 蜕变关系举例

$r$	$r_f$
{l-1a, l-2a, l-3a, l-4a;O-1a,O-2a}-->{l-1b, l-2a, l-3a, l-4a;O-1a,O-2a}	bill* = bill

以此类推，我们需要找到能够根据输出选项组合的变化确定输出变化的测试帧组。输出选项组合自对比结果如下表 5-13 所示：

表 5-13 输出选项组合自对比结果

	组别	原因
能够确定输出变化的组	{O-1a,O-2a} {O-1a,O-2b}	输出选项组合自对比能够确定 bill 的变化
不能够确定输出变化的组	{O-1a,O-2c} {O-1a,O-2d} {O-1a,O-2e} {O-1a,O-2f} {O-1b,O-2a} {O-1b,O-2b} {O-1b,O-2c} {O-1b,O-2d} {O-1b,O-2e} {O-1b,O-2f}	输出选项组合自对比不能够确定 bill 的变化

- 在组内比较的过程中，候选组的数目为 12，候选对的数目为 2。 $\{O-1a,O-2a\}$ 与 $\{O-1a,O-2b\}$ 组内分别有两个测试帧，每个组仅能够结合一次。故同组之间对比可得到的蜕变关系共 2 条。不同组间蜕变关系识别举例：

取 $\{O-1a,O-2a\}$ 组与 $\{O-1b,O-2a\}$ 进行对比。前者 O-choice 组合的意义为：当月话费等于套餐费用且等于 46；后者 O-choice 组合的意义为：当月话费大于套餐费用且套餐费用等于 46。这样我们可以很明显的得出从 $\{O-1a,O-2a\}$ 变化到 $\{O-1b,O-2a\}$ 所体现的当月话费的变化关系  $r_f$ ：当月话费增大( $bill^* > bill$ )。这样我们就可以随意地从两个组当中分别选出一个完整测试帧（记为 IO-CTF<sub>1</sub> 和 IO-CTP<sub>2</sub>），比较 IO-CTF<sub>1</sub> 和 IO-CTP<sub>2</sub> 的输入并得出变化关系  $r$ ，将  $r$  与  $r_f$  结合即可得到相应的蜕变关系。如：IO-CTF<sub>1</sub> 选择{l-1b, l-2a, l-3a, l-4a;O-1a,O-2a}，IO-CTF<sub>2</sub> 选择{l-1a, l-2a, l-3b, l-4a;O-1b,O-2a}，蜕变关系如下表 5-14 所示：

表 5-14 不同组间蜕变关系识别举例

r	r <sub>f</sub>
{l-1b, l-2a, l-3a, l-4a;O-1a,O-2a}-->{ l-1a, l-2a, l-3b, l-4a;O-1b,O-2a}	bill* > bill

同时我们也可以计算{O-1a,O-2a}与{O-1b,O-2a}组内测试帧进行对比所产生的蜕变关系数目，即两个组中测试帧所能产生组合的数目。

进行组间对比时，选取两个组并进行 O-choice 组合对比的次数为 66。首先选取两个 O-choice 组合存在变化关系的组，得出 O-choice 组合存在的变化关系 r<sub>f</sub>，再分别从两个组中选择一个测试帧，比较得出输入的变化关系 r。将 r 与 r<sub>f</sub> 结合即可得到蜕变关系。我在这里不再一一列出所有的蜕变关系，仅列出可以确定输入变化关系的候选组，如表 5-15 所示：

表 5-15 存在输出变化关系的候选组

存在输出变化关系的候选组	第一个组 中完整测试帧数目	第二个组 中完整测试帧数目	蜕变关系数	r <sub>f</sub> (第一组变化到第二组)
{O-1a,O-2a}与{O-1a,O-2b}	2	2	4	bill* > bill
{O-1a,O-2a}与{O-1a,O-2c}	2	1	2	bill* > bill
{O-1a,O-2a}与{O-1a,O-2d}	2	1	2	bill* > bill
{O-1a,O-2a}与{O-1a,O-2e}	2	1	2	bill* > bill
{O-1a,O-2a}与{O-1a,O-2f}	2	1	2	bill* > bill
{O-1a,O-2a}与{O-1b,O-2a}	2	6	12	bill* > bill
{O-1a,O-2a}与{O-1b,O-2b}	2	6	12	bill* > bill
{O-1a,O-2a}与{O-1b,O-2c}	2	3	6	bill* > bill
{O-1a,O-2a}与{O-1b,O-2d}	2	3	6	bill* > bill
{O-1a,O-2a}与{O-1b,O-2e}	2	3	6	bill* > bill
{O-1a,O-2a}与{O-1b,O-2f}	2	3	6	bill* > bill
{O-1a,O-2b}与{O-1a,O-2c}	2	1	2	bill* > bill
{O-1a,O-2b}与{O-1a,O-2d}	2	1	2	bill* > bill
{O-1a,O-2b}与{O-1a,O-2e}	2	1	2	bill* > bill
{O-1a,O-2b}与{O-1a,O-2f}	2	1	2	bill* > bill
{O-1a,O-2b}与{O-1b,O-2b}	2	6	12	bill* > bill
{O-1a,O-2b}与{O-1b,O-2c}	2	3	6	bill* > bill
{O-1a,O-2b}与{O-1b,O-2d}	2	3	6	bill* > bill
{O-1a,O-2b}与{O-1b,O-2e}	2	3	6	bill* > bill
{O-1a,O-2b}与{O-1b,O-2f}	2	3	6	bill* > bill
{O-1a,O-2c}与{O-1a,O-2d}	1	1	1	bill* > bill

表 5-15 存在输出变化关系的候选组（续）

存在输出变化关系的候选组	第一个组 中完整测试 帧数目	第二个组 中完整测试 帧数目	蜕变关系 数	$r_f$ (第一组变化 到第二组)
{O-1a,O-2c}与{O-1a,O-2e}	1	1	1	bill* > bill
{O-1a,O-2c}与{O-1a,O-2f}	1	1	1	bill* > bill
{O-1a,O-2c}与{O-1b,O-2c}	1	3	3	bill* > bill
{O-1a,O-2c}与{O-1b,O-2d}	1	3	3	bill* > bill
{O-1a,O-2c}与{O-1b,O-2e}	1	3	3	bill* > bill
{O-1a,O-2c}与{O-1b,O-2f}	1	3	3	bill* > bill
{O-1a,O-2d}与{O-1a,O-2e}	1	1	1	bill* > bill
{O-1a,O-2d}与{O-1a,O-2f}	1	1	1	bill* > bill
{O-1a,O-2d}与{O-1b,O-2d}	1	3	3	bill* > bill
{O-1a,O-2d}与{O-1b,O-2e}	1	3	3	bill* > bill
{O-1a,O-2d}与{O-1b,O-2f}	1	3	3	bill* > bill
{O-1a,O-2e}与{O-1a,O-2f}	1	1	1	bill* > bill
{O-1a,O-2e}与{O-1b,O-2e}	1	3	3	bill* > bill
{O-1a,O-2e}与{O-1b,O-2f}	1	3	3	bill* > bill
{O-1a,O-2f}与{O-1b,O-2f}	1	3	3	bill* > bill
			共计：140	

在组间比较过程中，候选组的数目为 66，候选对的数目为 140。

同组内得到的蜕变关系数目和组间得到的蜕变关系数目之和为 142。

### 5.3.4 结论

回答问题 1：在联通计费服务的实例研究中，METRIC\*成功识别出了该对象中的蜕变关系。METRIC\*被证明是可行的。

回答问题 2：对于联通计费服务，METRIC 需要比较的候选对的数目为 496，而 METRIC\*需要比较的候选对数目为 142。后者需要比较的候选对数目大大少于前者，说明 METRIC\*能够剔除无用候选对，有效减少对无用候选对进行判断的情况。

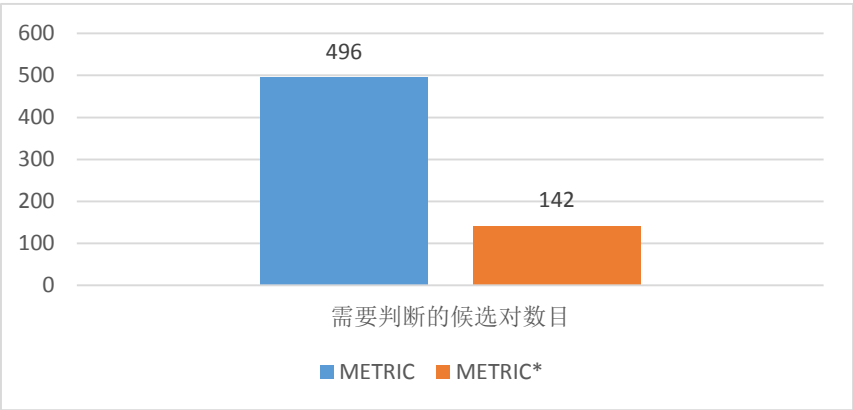


图 5-1 联通计费服务 METRIC 与 METRIC\*比较

METRIC\*方法可以有效减少对没有用的两个测试帧进行对比的情况，即按照METRIC\*方法所选择的两个测试帧基本上都是有用的。METRIC 方法中对于候选对的选取仅仅是简单的将两个测试帧组合到一起，METRIC\*方法在两个测试帧的选取上比 METRIC 更优秀。

5.4 实例研究二：航空行李托运计费服务

5.4.1 规格描述

航空行李托运计费服务参照中国国际航空公司行李计费标准，根据用户的座舱等级为用户提供查询行李计费、可携带的行李件数、每件行李可携带的最高重量等功能，每个功能作为一个服务接口。本研究只对行李计费功能进行实例研究。

（1） 输入规格描述如表 5-16 所示

表 5-16 输入规格描述

输入参数	参数类型	限制
airClass	int	数字 0-3
region	Int	数字 0-3
isStudent	boolean	
Luggage	double	
airfare	double	

airClass 被赋值 0、1、2、3 分别代表乘客座舱等级头等舱、公务舱、经济舱和婴儿票；region 被赋值 0、1 时分别代表国内和国际航班；isStudent 代表乘客是否为学生；Luggage 表示用户所携带的行李总重量，airfare 表示用户所购买的机票的价格。

## （2） 输出规格描述

计费表达式为： $\text{luggagefee} = (\text{luggage} - \text{benchmark}) * \text{airfare} * 0.015$ ,

上式中 luggagefee 为乘客应付的行李托运费，如果乘客的行李在限制范围内，则 luggagefee = 0；benchmark 为行李重量的限制标准，系统根据乘客的座舱等级和身份确认实际的 benchmark，如表 5-17 所示：

**表 5-17 输入规格描述**

airClass	benchmark
0	40
1	30
2	20
3	0

当乘客为国际乘客且为学生时，benchmark = 30，假设所有学生均持经济舱机票。

## 5.4.2 使用 METIRC 识别蜕变关系

首先生成航空行李托运计费服务的所有完整测试帧。

**完整测试帧生成：**

生成测试帧主要经历以下三个步骤：

### 1. 范畴和选项的划分：

将航空行李托运计费服务的输入参数定义为范畴，包含飞机座舱等级 airClass、区域 region、是否学生 isStudent、行李重量 Luggage 和飞机票价 airfare。详细的范畴和选项划分如下表 5-18 所示：

表 5-18 航空行李托运计费服务范畴选项划分

categories	choices
1. airClass	1a. 0（头等舱）
	1b. 1（公务舱）
	1c. 2（经济舱）
	1d. 3（婴儿票）
2. region	2a. 0（国内航班）
	2b. 1（国际航班）
3. isStudent	3a. 0（不是学生）
	3b. 1（是学生）
4. Luggage(L)	4a. L <= benchmark
	4b. L > benchmark
5. airfare(E)	5a. E = 0
	5b. E > 0

2. 将每对选择之间的关系记录至选择关系表，如表 5-19 所示：

表 5-19 航空行李托运计费服务选择关系表

	1a	1b	1c	1d	2a	2b	3a	3b	4a	4b	5a	5b
1a	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1c	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1d	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2a	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3a	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4a	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5a	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3. 使用选择关系表生成完整测试帧。

完整测试帧是选择的集合，这个集合包含每个范畴其中的一个选项，即完整测试帧是通过在每个范畴选择一个选项再根据选择关系表中选择的关系进行组合得到的。航空行李托运计费服务完整测试帧如表 5-20 所示：

表 5-20 航空行李托运计费服务完整测试帧

{1a,2a,3a,4a,5a}	{1a,2a,3a,4a,5b}	{1a,2a,3a,4b,5a}	{1a,2a,3a,4b,5b}
{1a,2b,3a,4a,5a}	{1a,2b,3a,4a,5b}	{1a,2b,3a,4b,5a}	{1a,2b,3a,4b,5b}
{1b,2a,3a,4a,5a}	{1b,2a,3a,4a,5b}	{1b,2a,3a,4b,5a}	{1b,2a,3a,4b,5b}
{1b,2b,3a,4a,5a}	{1b,2b,3a,4a,5b}	{1b,2b,3a,4b,5a}	{1b,2b,3a,4b,5b}
{1c,2a,3a,4a,5a}	{1c,2a,3a,4a,5b}	{1c,2a,3a,4b,5a}	{1c,2a,3a,4b,5b}
{1c,2b,3a,4a,5a}	{1c,2b,3a,4a,5b}	{1c,2b,3a,4b,5a}	{1c,2b,3a,4b,5b}
{1c,2a,3b,4a,5a}	{1c,2a,3b,4a,5b}	{1c,2a,3b,4b,5a}	{1c,2a,3b,4b,5b}
{1c,2b,3b,4a,5a}	{1c,2b,3b,4a,5b}	{1c,2b,3b,4b,5a}	{1c,2b,3b,4b,5b}
{1d,2a,3a,4a,5a}	{1d,2a,3a,4a,5b}	{1d,2a,3a,4b,5a}	{1d,2a,3a,4b,5b}
{1d,2b,3a,4a,5a}	{1d,2b,3a,4a,5b}	{1d,2b,3a,4b,5a}	{1d,2b,3a,4b,5b}

完整测试帧生成完毕后，将所有完整测试帧作为输入提供给 METRIC 的支持工具 MR-GEN 进行蜕变关系识别。

#### 蜕变关系识别：

设第一个测试帧的输出用 luggagefee 表示，第二个测试帧的输出用 luggagefee\*表示，部分蜕变关系如表 5-21 所示：

表 5-21 METRIC 方法识别出的蜕变关系

蜕变关系序号	r	r <sub>f</sub>
1	{1a,2a,3a,4a,5a}->{1a,2a,3a,4a,5b}	luggagefee* = luggagefee = 0
2	{1a,2a,3a,4a,5a}->{1a,2a,3a,4b,5a}	luggagefee* = luggagefee = 0
3	{1a,2a,3a,4a,5a}->{1a,2b,3a,4a,5a}	luggagefee* = luggagefee = 0
4	{1a,2a,3a,4a,5a}->{1b,2a,3a,4a,5a}	luggagefee* = luggagefee = 0
5	{1a,2a,3a,4a,5a}->{1c,2a,3a,4a,5a}	luggagefee* = luggagefee = 0
6	{1a,2a,3a,4a,5a}->{1d,2a,3a,4a,5a}	luggagefee* = luggagefee = 0
7	{1a,2a,3a,4a,5b}->{1a,2a,3a,4b,5b}	luggagefee* > luggagefee
8	{1a,2a,3a,4a,5b}->{1a,2b,3a,4a,5b}	luggagefee* = luggagefee = 0
9	{1a,2a,3a,4a,5b}->{1b,2a,3a,4a,5b}	luggagefee* = luggagefee = 0
10	{1a,2a,3a,4a,5b}->{1c,2a,3a,4a,5b}	luggagefee* = luggagefee = 0
11	{1a,2a,3a,4a,5b}->{1d,2a,3a,4a,5b}	luggagefee* = luggagefee = 0
12	{1a,2a,3a,4b,5a}->{1d,2a,3a,4b,5b}	luggagefee* > luggagefee
13	{1a,2b,3a,4a,5a}->{1a,2b,3a,4a,5b}	luggagefee* = luggagefee = 0
14	{1a,2b,3a,4a,5a}->{1a,2b,3a,4b,5a}	luggagefee* = luggagefee = 0
15	{1a,2b,3a,4a,5a}->{1b,2b,3a,4a,5a}	luggagefee* = luggagefee = 0
16	{1a,2b,3a,4a,5a}->{1c,2b,3a,4a,5a}	luggagefee* = luggagefee = 0
17	{1a,2b,3a,4a,5a}->{1d,2b,3a,4a,5a}	luggagefee* = luggagefee = 0
18	{1a,2b,3a,4a,5b}->{1a,2b,3a,4b,5b}	luggagefee* > luggagefee
19	{1a,2b,3a,4a,5b}->{1b,2b,3a,4a,5b}	luggagefee* = luggagefee = 0
20	{1a,2b,3a,4a,5b}->{1c,2b,3a,4a,5b}	luggagefee* = luggagefee = 0

过程中共生成 780 个候选对，如果要得到全部蜕变关系需要对全部 780 个候选对进行判断。

### 5.4.3 使用 METRIC\*识别蜕变关系

METRIC\*使用了包含输入范畴(I-category)和选项(I-choice)与输出范畴(O-category)和选项(O-choice)的测试帧识别蜕变关系。需要首先使用 CHOC’ LATE-DIP 生成包含输入输出的测试帧。

**完整测试帧生成：**

**1. 范畴和选项的划分：**

测试人员不仅需要鉴别出对软件执行行为有影响的输入参数或环境条件并定义范畴和选项，还需要鉴别出程序不同的输出情景并定义范畴和选项。联通计费服务的范畴和选项划分如表 5-22 所示：

**表 5-22 输入的范畴和选项划分**

I-categories	I-choices
I-1. airClass	I-1a. 0（头等舱）
	I-1b. 1（公务舱）
	I-1c. 2（经济舱）
	I-1d. 3（婴儿票）
I-2. region	I-2a. 0（国内航班）
	I-2b. 1（国际航班）
I-3. isStudent	I-3a. 0（不是学生）
	I-3b. 1（是学生）
I-4. Luggage(L)	I-4a. L <= benchmark
	I-4b. L > benchmark
I-5. airfare(E)	I-5a. E = 0
	I-5b. E > 0

**表 5-23 输出的范畴和选项划分**

output	O-category	O-choices
luggagefee	O-1. whether luggagefee is more than zero	O-1a. luggagefee = 0
		O-1b. luggagefee > 0

**2. 建立同时包含 I-choice 和 O-choice 的选择关系表，并且将选择之间的关系记录进入选择关系表中。航空行李托运计费服务的选择关系表如下表 5-24 所示：**



表 5-24 扩展的选择关系表

		I-choices												O-choices	
		I-1a	I-1b	I-1c	I-1d	I-2a	I-2b	I-3a	I-3b	I-4a	I-4b	I-5a	I-5b	O-1a	O-1b
I-choices	I-1a	⊐	⊑	⊑	⊑	⊐	⊐	⊐	⊑	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐
	I-1b	⊑	⊐	⊑	⊑	⊐	⊐	⊐	⊑	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐
	I-1c	⊑	⊑	⊐	⊑	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐
	I-1d	⊑	⊑	⊑	⊐	⊐	⊐	⊐	⊑	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐
	I-2a	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊑	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐
	I-2b	⊐	⊐	⊐	⊐	⊑	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐
	I-3a	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊑	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐
	I-3b	⊑	⊑	⊐	⊑	⊐	⊐	⊑	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐
	I-4a	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊑	⊐	⊐	⊐	⊑
	I-4b	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊑	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐
	I-5a	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊑	⊐	⊑
	I-5b	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊑	⊐	⊐	⊐
O	O-1a	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊑
	O-1b	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊐	⊑	⊐

3. 使用扩展的选择关系表生成完整测试帧。
- 依据扩展关系表中选项之间的关系将选项组合，形成表 5-25 的 IO-CTF。

表 5-25 航空行李计费服务 IO-CTF

{I-1a,I-2a,I-3a,I-4a,I-5a;O-1a}	{I-1a,I-2a,I-3a,I-4a,I-5b;O-1a}	{I-1a,I-2a,I-3a,I-4b,I-5a;O-1a}
{I-1a,I-2a,I-3a,I-4b,I-5b;O-1b}	{I-1a,I-2b,I-3a,I-4a,I-5a;O-1a}	{I-1a,I-2b,I-3a,I-4a,I-5b;O-1a}
{I-1a,I-2b,I-3a,I-4b,I-5a;O-1a}	{I-1a,I-2b,I-3a,I-4b,I-5b;O-1b}	{I-1b,I-2a,I-3a,I-4a,I-5a;O-1a}
{I-1b,I-2a,I-3a,I-4a,I-5b;O-1a}	{I-1b,I-2a,I-3a,I-4b,I-5a;O-1a}	{I-1b,I-2a,I-3a,I-4b,I-5b;O-1b}
{I-1b,I-2b,I-3a,I-4a,I-5a;O-1a}	{I-1b,I-2b,I-3a,I-4a,I-5b;O-1a}	{I-1b,I-2b,I-3a,I-4b,I-5a;O-1a}
{I-1b,I-2b,I-3a,I-4b,I-5b;O-1b}	{I-1c,I-2a,I-3a,I-4a,I-5a;O-1a}	{I-1c,I-2a,I-3a,I-4a,I-5b;O-1a}
{I-1c,I-2a,I-3a,I-4b,I-5a;O-1a}	{I-1c,I-2a,I-3a,I-4b,I-5b;O-1b}	{I-1c,I-2b,I-3a,I-4a,I-5a;O-1a}
{I-1c,I-2b,I-3a,I-4a,I-5b;O-1a}	{I-1c,I-2b,I-3a,I-4b,I-5a;O-1a}	{I-1c,I-2b,I-3a,I-4b,I-5b;O-1b}
{I-1c,I-2a,I-3b,I-4a,I-5a;O-1a}	{I-1c,I-2a,I-3b,I-4a,I-5b;O-1a}	{I-1c,I-2a,I-3b,I-4b,I-5a;O-1a}
{I-1c,I-2a,I-3b,I-4b,I-5b;O-1b}	{I-1c,I-2b,I-3b,I-4a,I-5a;O-1a}	{I-1c,I-2b,I-3b,I-4a,I-5b;O-1a}
{I-1c,I-2b,I-3b,I-4b,I-5a;O-1a}	{I-1c,I-2b,I-3b,I-4b,I-5b;O-1b}	{I-1d,I-2a,I-3a,I-4a,I-5a;O-1a}
{I-1d,I-2a,I-3a,I-4a,I-5b;O-1a}	{I-1d,I-2a,I-3a,I-4b,I-5a;O-1a}	{I-1d,I-2a,I-3a,I-4b,I-5b;O-1b}
{I-1d,I-2b,I-3a,I-4a,I-5a;O-1a}	{I-1d,I-2b,I-3a,I-4a,I-5b;O-1a}	{I-1d,I-2b,I-3a,I-4b,I-5a;O-1a}
{I-1d,I-2b,I-3a,I-4b,I-5b;O-1b}		

测试帧生成完毕后，按照 METRIC\*方法的步骤，我们将对联通计费服务进行蜕变关系识别。

蜕变关系识别：

按 O-choice 将 IO-CTF 归类，具有相同 O-choice 组合的 IO-CTF 归为一组，如表 5-26 所示：

表 5-26 航空行李计费服务 IO-CTF 分类

O-choices	Complete test frames	
O-1a. luggagefee = 0	{l-1a,l-2a,l-3a,l-4a,l-5a;O-1a}	{l-1a,l-2a,l-3a,l-4a,l-5b;O-1a}
	{l-1a,l-2a,l-3a,l-4b,l-5a;O-1a}	{l-1a,l-2b,l-3a,l-4a,l-5a;O-1a}
	{l-1a,l-2b,l-3a,l-4a,l-5b;O-1a}	{l-1a,l-2b,l-3a,l-4b,l-5a;O-1a}
	{l-1b,l-2a,l-3a,l-4a,l-5a;O-1a}	{l-1b,l-2a,l-3a,l-4a,l-5b;O-1a}
	{l-1b,l-2a,l-3a,l-4b,l-5a;O-1a}	{l-1b,l-2b,l-3a,l-4a,l-5a;O-1a}
	{l-1b,l-2b,l-3a,l-4a,l-5b;O-1a}	{l-1b,l-2b,l-3a,l-4b,l-5a;O-1a}
	{l-1c,l-2a,l-3a,l-4a,l-5a;O-1a}	{l-1c,l-2a,l-3a,l-4a,l-5b;O-1a}
	{l-1c,l-2a,l-3a,l-4b,l-5a;O-1a}	{l-1c,l-2b,l-3a,l-4a,l-5a;O-1a}
	{l-1c,l-2b,l-3a,l-4a,l-5b;O-1a}	{l-1c,l-2b,l-3a,l-4b,l-5a;O-1a}
	{l-1c,l-2a,l-3b,l-4a,l-5a;O-1a}	{l-1c,l-2a,l-3b,l-4a,l-5b;O-1a}
	{l-1c,l-2a,l-3b,l-4b,l-5a;O-1a}	{l-1c,l-2b,l-3b,l-4a,l-5a;O-1a}
	{l-1c,l-2b,l-3b,l-4a,l-5b;O-1a}	{l-1c,l-2b,l-3b,l-4b,l-5a;O-1a}
	{l-1d,l-2a,l-3a,l-4a,l-5a;O-1a}	{l-1d,l-2a,l-3a,l-4a,l-5b;O-1a}
	{l-1d,l-2a,l-3a,l-4b,l-5a;O-1a}	{l-1d,l-2b,l-3a,l-4a,l-5a;O-1a}
	{l-1d,l-2b,l-3a,l-4a,l-5b;O-1a}	{l-1d,l-2b,l-3a,l-4b,l-5a;O-1a}
O-1b. luggagefee > 0	{l-1a,l-2a,l-3a,l-4b,l-5b;O-1b}	{l-1a,l-2b,l-3a,l-4b,l-5b;O-1b}
	{l-1b,l-2a,l-3a,l-4b,l-5b;O-1b}	{l-1b,l-2b,l-3a,l-4b,l-5b;O-1b}
	{l-1c,l-2a,l-3a,l-4b,l-5b;O-1b}	{l-1c,l-2b,l-3a,l-4b,l-5b;O-1b}
	{l-1c,l-2a,l-3b,l-4b,l-5b;O-1b}	{l-1c,l-2b,l-3b,l-4b,l-5b;O-1b}
	{l-1d,l-2a,l-3a,l-4b,l-5b;O-1b}	{l-1d,l-2b,l-3a,l-4b,l-5b;O-1b}

检查同组内的每对不同完整测试帧，得到如何从一个 I-choice 组合到另一个 I-choice 组合的变换关系。即可得到一个蜕变关系：当某一 I-choice 组合变换到另一 I-choice 组合，输出依然在某一 O-choice 组合内。对于两个不同组，检查两组对应的 O-choice 组合是否存在某种关系  $r_f$ ，检查该两组间的每对不同完整测试帧，得到如何从一个 I-choice 组合到另一个 I-choice 组合的变换关系，即可得到一个蜕变关系：当某一 I-choice 组合变换到另一 I-choice 组合，输出存在关系  $r_f$ 。

按照以上思路，我们对航空行李托运计费服务进行蜕变关系识别。

#### 1. 组内比较：

对于 O-1a 组内的完整测试帧，任选两个并进行组合（完整测试帧记为 IO-CTF<sub>1</sub> 和 IO-CTF<sub>2</sub>），可得到如下形式的蜕变关系：当输入由 IO-CTF<sub>1</sub> 的 I-choice

变化成 IO-CTF<sub>2</sub> 的 I-choice，输出不变且为 0。

举例：

我们将{l-1a, l-2a, l-3a, l-4a, l-5a;O-1a}与{l-1c, l-2b, l-3a, l-4a, l-5b;O-1a}进行比较。首先由于 O-choice 不变，故  $r_f$  为：行李费用不变化且为 0 ( $\text{luggagefee}^* = \text{luggagefee} = 0$ )。我们再对输入进行比较，可得到输入之间的变化关系  $r$  为：乘客不是学生，行李重量小于限制标准，乘客的舱位由头等舱变化为公务舱，航班由国内航班变化为国际航班，机票费用由 0 变化为大于 0。接下来我们将  $r$  与  $r_f$  组合在一起即可得到如下蜕变关系：在乘客不是学生、行李重量小于限制标准、乘客的舱位由头等舱变化为公务舱、航班由国内航班变化为国际航班、机票费用由 0 变化为大于 0 的情况下，行李费用不产生变化且等于 0。完整测试帧如表 5-27：

表 5-27 组内测试帧对比得到的蜕变关系举例

$r$	$r_f$
{l-1a, l-2a, l-3a, l-4a, l-5a;O-1a}--> {l-1c, l-2b, l-3a, l-4a, l-5b;O-1a}	$\text{luggagefee}^* = \text{luggagefee} = 0$

对于 O-1b 组，我们无法进行组内比较，原因是我们仅仅能够得知组内两个测试帧的输出都满足大于 0 的条件，但是输出之间的变化我们无法像 O-1a 组那样确定下来。

蜕变关系可以通过测试帧两两组合得到  $r$  并结合  $r_f$  得出，这里不再列出蜕变关系。组内比较可得到的蜕变关系数目是  $C_{30}^2 = 435$ 。

2. 组间比较：

对于 O-1a 组与 O-1b 组，我们首先比较 O-choice 组合的变化得出  $r_f$ ：O-1a 变化为 O-1b 时，行李费用增大 ( $\text{luggagefee}^* > \text{luggagefee}$ )。

从 O-1a 组中选择一个完整测试帧 IO-CTF<sub>3</sub>，从 O-1b 组中选择一个完整测试帧 IO-CTF<sub>4</sub>，把 IO-CTF<sub>3</sub> 与 IO-CTF<sub>4</sub> 进行组合可得到形式如下的蜕变关系：当输出由 IO-CTF<sub>3</sub> 的 I-choice 变化成 IO-CTF<sub>4</sub> 的 I-choice，行李费用增大。

举例：

{l-1a, l-2a, l-3a, l-4a, l-5a;O-1a}与{l-1a, l-2b, l-3a, l-4b, l-5b;O-1b}进行比较。首先 O-choice 的变化关系  $r_f$  上面已经给出：O-1a 变化为 O-1a 时，行李费用增大 ( $\text{luggagefee}^* > \text{luggagefee}$ )。接下来比较两个测试帧得出输入之间的变化关系  $r$ ：乘客舱位为头等舱，乘客是学生，航班类型由国内航班变化为国际航班，行李重量由小于限制标准变化为大于限值标准，机票费用由等于 0

变化为大于 0。我们将  $r$  与  $r_f$  进行结合就可以得到如下蜕变关系：在乘客舱位为头等舱、乘客是学生、航班类型由国内航班变化为国际航班、行李重量由小于限制标准变化为大于限值标准、机票费用由等于 0 变化为大于 0 的情况下，行李费用增大。用完整测试帧表示如表 5-28：

表 5-28 组间测试帧对比得到的蜕变关系举例

$r$	$r_f$
{l-1a, l-2a, l-3a, l-4a, l-5a;O-1a}--> { l-1a, l-2b, l-3a, l-4b, l-5b;O-1b}	luggagefee* > luggagefee

蜕变关系可以通过测试帧两两组合得到  $r$  并结合组间关系  $r_f$  得出。

在组内比较中，共生成 2 个候选组，435 个候选对。在组间比较过程中，共生成 1 个候选组，300 个候选对。共计 3 个候选组，735 个候选对。

### 5.4.4 结论

回答问题 1：在航空行李托运计费服务的实例研究中，METRIC\*成功识别出了该对象中的蜕变关系。METRIC\*被证明是可行的。

回答问题 2：对于航空行李托运计费服务，METRIC 需要比较的候选对的数目为 780，而 METRIC\*需要比较的候选对数目为 735。后者需要比较的候选对数略少于前者，说明 METRIC\*能够剔除无用候选对，在一定程度上减少对无用候选对进行判断的情况。

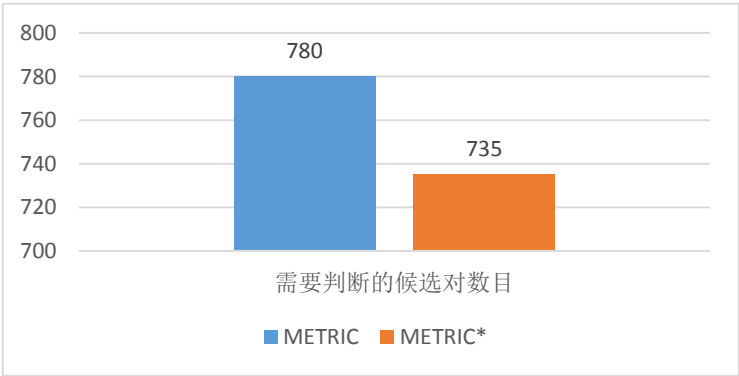


图 5-2 航空行李托运计费服务 METRIC 对比 METRIC\*

在这个实例中 METRIC\*仅仅减少了很小一部分需要判断的候选对数目。

## 5.5 实例研究三：费用补偿系统 EXP

### 5.5.1 规格描述

费用补偿系统协助公司销售总监：（1）确定每个高级销售经理和销售经理因使用公司车辆产生的“过度”英里数而应向公司补偿的费用（2）处理高级销售经理、销售经理和销售主管有关机票、酒店住宿、吃饭和电话等各种类型的补偿请求。

（1） 输入规格描述如表 5-29 所示：

表 5-29 EXP 输入规格描述 1

输入参数	类型
Staff ID	String
Staff name	String
Staff level	int
Actual mileage for the month	double
Monthly sales amount	double
Airfare	double

Staff ID 表示员工的 ID；Staff name 表示员工姓名；Staff level 表示员工的等级，有高级销售经理（senior sales manager）、销售经理（sales manager）和销售主管（sales supervisor）；Actual mileage for the month 表示当月实际英里数，即使用公司车辆的英里数；Monthly sales amount 表示当月实际销售额；Airfare 表示当月机票费用，即员工申请补偿的机票费用。

由于公司车辆仅指派给高级销售经理和销售经理使用，因此 Actual mileage for the month 仅对高级销售经理和销售经理有用。

如果当月实际销售额不少于\$100,000，则还会出现其他费用报销的输入界面，参数如表 5-30 所示：

表 5-30 EXP 输入规格描述 2

输入参数	类型
Other expenses	double

（2） 输出规格描述

费用补偿系统的输出规格描述如下表 5-31 所示：

**表 5-31 EXP 输出规格描述**

输出参数	类型
Staff ID	String
Staff name	String
Staff level	int
Total reimbursement amount	double

Staff ID 表示员工的 ID；Staff name 表示员工姓名；Staff level 表示员工的等；Total reimbursement amount 为全部补偿费用，其计算方法如表 5-32 所示：

**表 5-32 EXP 补偿费用计算方法**

员工等级	计算方法
高级销售经理、销售经理	全部补偿费用=机票补偿费用+其他补偿费用-偿付公司的额外英里数费用
销售主管	全部补偿费用=机票补偿费用+其他补偿费用

当下表的条件满足时，高级销售经理、销售经理和销售主管可以享受飞机票补偿，条件如表 5-33 所示：

**表 5-33 飞机票补偿条件**

员工等级	条件
高级销售经理	没有条件
销售经理	当月销售额 $\geq \$50,000$
销售主管	当月销售额 $\geq \$80,000$

若当月销售额不少于\$100,000，任何等级的员工都可享受其他费用补偿。

偿付公司的额外英里数费用对于不同等级的员工有不同的计算方法。对于每一个高级销售经理和销售经理，每月有定量的公司车辆使用英里数限额（x 公里），高级销售经理为  $x=4000$ ，销售经理为  $x=3000$ 。若一个员工当月实际车辆使用英里数（y 公里）没有超过限额的话，那么他不需要向公司偿付额外英里数费用；如果超过限额的话，那么需要根据下表 5-34 计算向公司偿付的额外英里数费用：

**表 5-34 额外英里数费用计算**

员工等级	每月限额	向公司偿付的费用	偿付条件
高级销售经理	4000	$\$ 5 \cdot (y-x)$	$y > x$
销售经理	3000	$\$ 8 \cdot (y-x)$	$y > x$

5.5.2 使用 METRIC 识别蜕变关系

METRIC 框架使用 CHOC’LATE 测试用例生成方法产生的完整测试帧并识别蜕变关系，故需要先生成测试对象的测试帧。

完整测试帧生成：

生成测试帧主要经历以下三个步骤：

1. 划分范畴和选项。

测试人员首先鉴别出对软件执行行为有影响的输入参数或环境条件。输入参数或环境条件被定义为范畴(category)。每一个范畴被进一步划分为不同的选项(choice)，选项代表着其所属范畴可能产生的不同情况。费用补偿系统的范畴和选项划分如表 5-35 所示：

表 5-35 EXP 范畴和选项的划分

Categories	Choices
1. Staff Level	1a. senior sales manager
	1b. sales manager
	1c. sales supervisor
2. Actual Monthly Mileage(y)	2a. $0 \leq y \leq 3,000$
	2b. $3,000 < y \leq 4,000$
	2c. $y > 4000$
3. Mountly Sales Amount(s)	3a. $0 \leq s < 50,000$
	3b. $50,000 \leq s < 80,000$
	3c. $80,000 \leq s < 100,000$
	3d. $s \geq 100,000$
4. Airfare(f)	4a. $f = 0$
	4b. $f > 0$
5. Other Expenses(e)	5a. $e = 0$
	5b. $e > 0$

2. 确定每对选择之间的关系，并将关系记录至选择关系表，如下表 5-36 所示：

表 5-36 EXP 选择关系表

	1a	1b	1c	2a	2b	2c	3a	3b	3c	3d	4a	4b	5a	5b
1a	□	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
1b	☑	□	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
1c	☑	☑	□	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
2a	☑	☑	☑	□	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
2b	☑	☑	☑	☑	□	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
2c	☑	☑	☑	☑	☑	□	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
3a	☑	☑	☑	☑	☑	☑	□	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
3b	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	□	☑	☑	☑	☑	☑	☑
3c	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	□	☑	☑	☑	☑	☑
3d	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	□	☑	☑	☑	☑
4a	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	□	☑	☑	☑
4b	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	□	☑	☑
5a	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	□	☑
5b	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	□

### 3. 使用选择关系表生成完整测试帧

完整测试帧是选择的集合，这个集合包含每个范畴其中的一个选项，即完整测试帧是通过在每个范畴选择一个选项再根据选择关系表中选择的关系进行组合得到的。EXP 的完整测试帧如下表 5-37 所示：

表 5-37 EXP 完整测试帧

{1a,2a,3a,4a}	{1a,2a,3a,4b}	{1a,2a,3b,4a}	{1a,2a,3b,4b}
{1a,2a,3c,4a}	{1a,2a,3c,4b}	{1a,2a,3d,4a,5a}	{1a,2a,3d,4a,5b}
{1a,2a,3d,4b,5a}	{1a,2a,3d,4b,5b}	{1a,2b,3a,4a}	{1a,2b,3a,4b}
{1a,2b,3b,4a}	{1a,2b,3b,4b}	{1a,2b,3c,4a}	{1a,2b,3c,4b}
{1a,2b,3d,4a,5a}	{1a,2b,3d,4a,5b}	{1a,2b,3d,4b,5a}	{1a,2b,3d,4b,5b}
{1a,2c,3a,4a}	{1a,2c,3a,4b}	{1a,2c,3b,4a}	{1a,2c,3b,4b}
{1a,2c,3c,4a}	{1a,2c,3c,4b}	{1a,2c,3d,4a,5a}	{1a,2c,3d,4a,5b}
{1a,2c,3d,4b,5a}	{1a,2c,3d,4b,5b}	{1b,2a,3a,4a}	{1b,2a,3a,4b}
{1b,2a,3b,4a}	{1b,2a,3b,4b}	{1b,2a,3c,4a}	{1b,2a,3c,4b}
{1b,2a,3d,4a,5a}	{1b,2a,3d,4a,5b}	{1b,2a,3d,4b,5a}	{1b,2a,3d,4b,5b}
{1b,2b,3a,4a}	{1b,2b,3a,4b}	{1b,2b,3b,4a}	{1b,2b,3b,4b}
{1b,2b,3c,4a}	{1b,2b,3c,4b}	{1b,2b,3d,4a,5a}	{1b,2b,3d,4a,5b}
{1b,2b,3d,4b,5a}	{1b,2b,3d,4b,5b}	{1b,2c,3a,4a}	{1b,2c,3a,4b}
{1b,2c,3b,4a}	{1b,2c,3b,4b}	{1b,2c,3c,4a}	{1b,2c,3c,4b}
{1b,2c,3d,4a,5a}	{1b,2c,3d,4a,5b}	{1b,2c,3d,4b,5a}	{1b,2c,3d,4b,5b}
{1c,3a,4a}	{1c,3a,4b}	{1c,3b,4a}	{1c,3b,4b}
{1c,3c,4a}	{1c,3c,4b}	{1c,3d,4a,5a}	{1c,3d,4a,5b}
{1c,3d,4b,5a}	{1c,3d,4b,5b}		



完整测试帧生成完毕后，将所有完整测试帧作为输入提供给 METRIC 的支持工具 MR-GEN 进行蜕变关系识别。

**蜕变关系识别：**

依据 METRIC 的三个步骤对费用补偿系统 EXP 进行蜕变关系识别。第一个完整测试帧的输出用 amount 表示，第二个完整测试帧的输出用 amount\* 表示，部分蜕变关系如表 5-38 所示：

**表 5-38 METRIC 方法得到的 EXP 的部分蜕变关系**

蜕变关系序号	r	r <sub>f</sub>
1	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2a,3a,4b}	amount* > amount
2	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2a,3b,4a}	amount* = amount = 0
3	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2a,3c,4a}	amount* = amount = 0
4	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2b,3a,4a}	amount* = amount = 0
5	{1a,2a,3a,4a} -> {1a,2c,3a,4a}	amount* < amount
6	{1a,2a,3a,4a} -> {1b,2a,3a,4a}	amount* = amount = 0
7	{1a,2a,3b,4a} -> {1a,2a,3b,4b}	amount* > amount
8	{1a,2a,3b,4a} -> {1a,2a,3c,4a}	amount* = amount = 0
9	{1a,2a,3b,4a} -> {1a,2b,3b,4a}	amount* = amount = 0
10	{1a,2a,3b,4a} -> {1a,2c,3b,4a}	amount* < amount
11	{1a,2a,3b,4a} -> {1b,2a,3b,4a}	amount* = amount = 0
12	{1a,2a,3c,4a} -> {1a,2a,3c,4b}	amount* > amount
13	{1a,2a,3c,4a} -> {1a,2b,3c,4a}	amount* = amount = 0
14	{1a,2a,3c,4a} -> {1a,2c,3c,4a}	amount* < amount
15	{1a,2a,3c,4a} -> {1b,2a,3c,4a}	amount* = amount = 0
16	{1a,2a,3d,4a,5a} -> {1a,2a,3d,4a,5b}	amount* > amount
17	{1a,2a,3d,4a,5a} -> {1a,2a,3d,4b,5a}	amount* > amount
18	{1a,2a,3d,4a,5a} -> {1a,2b,3d,4a,5a}	amount* = amount = 0
19	{1a,2a,3d,4a,5a} -> {1a,2c,3d,4a,5a}	amount* < amount
20	{1a,2a,3d,4a,5a} -> {1b,2a,3d,4a,5a}	amount* = amount = 0

共生成 2145 个候选对，如果要得到全部蜕变关系需要对全部 2145 个候选对进行判断。

### 5.5.3 使用 METRIC\* 识别蜕变关系

METRIC\* 使用了包含输入范畴(I-category)和选项(I-choice)与输出范畴(O-category)和选项(O-choice)的测试帧识别蜕变关系。需要首先使用 CHOC’ LATE-DIP 生成包含输入输出的测试帧。

**完整测试帧生成：**

生成测试帧主要经历以下三个步骤：

## 1. 划分范畴和选项

测试人员不仅需要鉴别出对软件执行行为有影响的输入参数或环境条件并定义范畴和选项，还需要鉴别出程序不同的输出情景并定义范畴和选项。费用补偿系统的范畴和选项划分如表 5-39 所示：

**表 5-39 EXP 的输入范畴和选项的划分**

I-categories	I-choices
I-1. Staff Level	I-1a. senior sales manager
	I-1b. sales manager
	I-1c. sales supervisor
I-2. Actual Monthly Mileage(y)	I-2a. $0 \leq y \leq 3,000$
	I-2b. $3,000 < y \leq 4,000$
	I-2c. $y > 4000$
I-3. Monthly Sales Amount(s)	I-3a. $0 \leq s < 50,000$
	I-3b. $50,000 \leq s < 80,000$
	I-3c. $80,000 \leq s < 100,000$
	I-3d. $s \geq 100,000$
I-4. Airfare(f)	I-4a. $f = 0$
	I-4b. $f > 0$
I-5. Other Expenses(e)	I-5a. $e = 0$
	I-5b. $e > 0$

全部补偿费用(amount)=机票补偿费用(airfare)+其他补偿费用(other expenses)+偿付公司的额外英里数费用(fee for the use of car)，我按照这三个构成因素将 O-category 划分为三部分，如表 5-40 所示：

**表 5-40 EXP 的输出范畴和选项的划分**

Output	O-category	O-choices
amount	O-1. fee for the use of car (c)	O-1a. $c = 0$
		O-1b. $c < 0$
	O-2. actual reimbursement of airfare(f)	O-2a. $f = 0$
		O-2b. $f > 0$
	O-3. actual reimbursement of other expenses(e)	O-3a. $e = 0$
		O-3b. $e > 0$

这里偿付公司的额外英里数费用为负数时表示应向公司偿还额外英里数费用。

## 2. 建立同时包含 I-choice 和 O-choice 的选择关系表，并且将选择之间的关系记录进入选择关系表中。

EXP 扩展的选择关系表如表 5-41 所示：

表 5-41 扩展的选择关系表

		I-choices																			
		I-1a	I-1b	I-1c	I-2a	I-2b	I-2c	I-3a	I-3b	I-3c	I-3d	I-4a	I-4b	I-5a	I-5b	O-1a	O-1b	O-2a	O-2b	O-3a	O-3b
I-choices	I-1a	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	I-1b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	I-1c	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	I-2a	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	I-2b	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	I-2c	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	I-3a	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	I-3b	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	I-3c	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	I-3d	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	I-4a	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	I-4b	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	I-5a	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	I-5b	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
O-choices	O-1a	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	O-1b	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	O-2a	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	O-2b	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	O-3a	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	O-3b	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

注：这里存在一个问题。当一个 sales manager 的月销售额不小于\$50000 时，他可以获得飞机票补偿，这种情况属于两个 I-choice 决定一个 O-choice，这种关系不能很好地在选择关系表中表达，因此会产生无效测试帧的情况。故根据这个表生成测试帧后需要将无效的测试帧除去。类似的两个 I-choice 决定一个 O-choice 的情况还有：（1）当 sales supervisor 的月销售额不小于\$80000 时，他可以获得飞机票补偿；（2）当 senior sales manager 的当月车辆使用英里数大于 4000 时，需要向公司偿付的额外英里数费用；（3）当 sales manager 的当月车辆使用英里数大于 3000 时，需要向公司偿付额外英里数费用。

### 3. 使用扩展的选择关系表生成完整测试帧

依据选择关系表中选项与选项之间的关系，将不同范畴中的选项组合在一起，即可得到包含输入输出的完整测试帧。EXP 的 IO-CTF 如下表 5-42 所示：

表 5-42 EXP 的 IO-CTF

{ I-1a, I-2a, I-3a, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1a, I-2a, I-3a, I-4b;O-1a,O-2b,O-3a}	{ I-1a, I-2a, I-3b, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}
{ I-1a, I-2a, I-3b, I-4b;O-1a,O-2b,O-3a}	{ I-1a, I-2a, I-3c, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1a, I-2a, I-3c, I-4b;O-1a,O-2b,O-3a}
{ I-1a, I-2a, I-3d, I-4a, I-5a;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1a, I-2a, I-3d, I-4a, I-5b;O-1a,O-2a,O-3b}	{ I-1a, I-2a, I-3d, I-4b, I-5a;O-1a,O-2b,O-3a}
{ I-1a, I-2a, I-3d, I-4b, I-5b;O-1a,O-2b,O-3b}	{ I-1a, I-2b, I-3a, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1a, I-2b, I-3a, I-4b;O-1a,O-2b,O-3a}
{ I-1a, I-2b, I-3b, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1a, I-2b, I-3b, I-4b;O-1a,O-2b,O-3a}	{ I-1a, I-2b, I-3c, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}
{ I-1a, I-2b, I-3c, I-4b;O-1a,O-2b,O-3a}	{ I-1a, I-2b, I-3d, I-4a, I-5a;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1a, I-2b, I-3d, I-4a, I-5b;O-1a,O-2a,O-3b}
{ I-1a, I-2b, I-3d, I-4b, I-5a;O-1a,O-2b,O-3a}	{ I-1a, I-2b, I-3d, I-4b, I-5b;O-1a,O-2b,O-3b}	{ I-1a, I-2c, I-3a, I-4a;O-1b,O-2a,O-3a}
{ I-1a, I-2c, I-3a, I-4b;O-1b,O-2b,O-3a}	{ I-1a, I-2c, I-3b, I-4a;O-1b,O-2a,O-3a }	{ I-1a, I-2c, I-3b, I-4b;O-1b,O-2b,O-3a}
{ I-1a, I-2c, I-3c, I-4a;O-1b,O-2a,O-3a}	{ I-1a, I-2c, I-3c, I-4b;O-1b,O-2b,O-3a}	{ I-1a, I-2c, I-3d, I-4a, I-5a;O-1b,O-2a,O-3a}
{ I-1a, I-2c, I-3d, I-4a, I-5b;O-1b,O-2a,O-3b}	{ I-1a, I-2c, I-3d, I-4b, I-5a;O-1b,O-2b,O-3a}	{ I-1a, I-2c, I-3d, I-4b, I-5b;O-1b,O-2b,O-3b}
{ I-1b, I-2a, I-3a, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1b, I-2a, I-3a, I-4b;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1b, I-2a, I-3b, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}
{ I-1b, I-2a, I-3b, I-4b;O-1a,O-2b,O-3a}	{ I-1b, I-2a, I-3c, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1b, I-2a, I-3c, I-4b;O-1a,O-2b,O-3a}
{ I-1b, I-2a, I-3d, I-4a, I-5a;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1b, I-2a, I-3d, I-4a, I-5b;O-1a,O-2a,O-3b}	{ I-1b, I-2a, I-3d, I-4b, I-5a;O-1a,O-2b,O-3a}
{ I-1b, I-2a, I-3d, I-4b, I-5b;O-1a,O-2b,O-3b}	{ I-1b, I-2b, I-3a, I-4a;O-1b,O-2a,O-3a}	{ I-1b, I-2b, I-3a, I-4b;O-1b,O-2a,O-3a}
{ I-1b, I-2b, I-3b, I-4a;O-1b,O-2a,O-3a}	{ I-1b, I-2b, I-3b, I-4b;O-1b,O-2b,O-3a}	{ I-1b, I-2b, I-3c, I-4a;O-1b,O-2a,O-3a}
{ I-1b, I-2b, I-3c, I-4b;O-1b,O-2b,O-3a}	{ I-1b, I-2b, I-3d, I-4a, I-5a;O-1b,O-2a,O-3a}	{ I-1b, I-2b, I-3d, I-4a, I-5b;O-1b,O-2a,O-3b}
{ I-1b, I-2b, I-3d, I-4b, I-5a;O-1b,O-2b,O-3a}	{ I-1b, I-2b, I-3d, I-4b, I-5b;O-1b,O-2b,O-3b}	{ I-1b, I-2c, I-3a, I-4a;O-1b,O-2a,O-3a}
{ I-1b, I-2c, I-3a, I-4b;O-1b,O-2a,O-3a}	{ I-1b, I-2c, I-3b, I-4a;O-1b,O-2a,O-3a}	{ I-1b, I-2c, I-3b, I-4b;O-1b,O-2b,O-3a}
{ I-1b, I-2c, I-3c, I-4a;O-1b,O-2a,O-3a}	{ I-1b, I-2c, I-3c, I-4b;O-1b,O-2b,O-3a}	{ I-1b, I-2c, I-3d, I-4a, I-5a;O-1b,O-2a,O-3a}
{ I-1b, I-2c, I-3d, I-4a, I-5b;O-1b,O-2a,O-3b}	{ I-1b, I-2c, I-3d, I-4b, I-5a;O-1b,O-2b,O-3a}	{ I-1b, I-2c, I-3d, I-4b, I-5b;O-1b,O-2b,O-3b}
{ I-1c, I-3a, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1c, I-3a, I-4b;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1c, I-3b, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}
{ I-1c, I-3b, I-4b;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1c, I-3c, I-4a;O-1a,O-2a,O-3a}	{ I-1c, I-3c, I-4b;O-1a,O-2b,O-3a}
{ I-1c, I-3d, I-4a, I-5a;O-1a,O-2a,O-3a }	{ I-1c, I-3d, I-4a, I-5b;O-1a,O-2a,O-3b}	{ I-1c, I-3d, I-4b, I-5a;O-1a,O-2b,O-3a}
{ I-1c, I-3d, I-4b, I-5b;O-1a,O-2b,O-3b}		

测试帧生成完毕后，按照 METRIC\*方法的步骤，我们将对联通计费服务进行蜕变关系识别。

### 蜕变关系识别：

按 O-choice 将 IO-CTF 归类，具有相同 O-choice 组合的 IO-CTF 归为一组。分类结果如下表 5-43 所示：

表 5-43 IO-CTF 的分类

O-choices 组合	Complete test frames
{O-1a,O-2a,O-3a}	{l-1a,l-2a,l-3a,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1a,l-2a,l-3b,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1a,l-2a,l-3c,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1a,l-2a,l-3d,l-4a,l-5a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1a,l-2b,l-3a,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1a,l-2b,l-3b,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1a,l-2b,l-3c,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1a,l-2b,l-3d,l-4a,l-5a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2a,l-3a,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2a,l-3b,l-4b;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2a,l-3b,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2a,l-3c,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2a,l-3d,l-4a,l-5a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1c,l-3a,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1c,l-3a,l-4b;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1c,l-3b,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1c,l-3b,l-4b;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1c,l-3c,l-4a;O-1a,O-2a,O-3a} {l-1c,l-3d,l-4a,l-5a;O-1a,O-2a,O-3a}
{O-1a,O-2a,O-3b}	{l-1a,l-2a,l-3d,l-4a,l-5b;O-1a,O-2a,O-3b} {l-1a,l-2b,l-3d,l-4a,l-5b;O-1a,O-2a,O-3b} {l-1b,l-2a,l-3d,l-4a,l-5b;O-1a,O-2a,O-3b} {l-1c,l-3d,l-4a,l-5b;O-1a,O-2a,O-3b}
{O-1a,O-2b,O-3a}	{l-1a,l-2a,l-3a,l-4b;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1a,l-2a,l-3b,l-4b;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1a,l-2a,l-3c,l-4b;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1a,l-2a,l-3d,l-4b,l-5a;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1a,l-2b,l-3a,l-4b;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1a,l-2b,l-3b,l-4b;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1a,l-2b,l-3c,l-4b;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1a,l-2b,l-3d,l-4b,l-5a;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1b,l-2a,l-3b,l-4b;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1b,l-2a,l-3c,l-4b;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1b,l-2a,l-3d,l-4b,l-5a;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1c,l-3c,l-4b;O-1a,O-2b,O-3a} {l-1c,l-3d,l-4b,l-5a;O-1a,O-2b,O-3a}
{O-1a,O-2b,O-3b}	{l-1a,l-2a,l-3d,l-4b,l-5b;O-1a,O-2b,O-3b} {l-1a,l-2b,l-3d,l-4b,l-5b;O-1a,O-2b,O-3b} {l-1b,l-2a,l-3d,l-4b,l-5b;O-1a,O-2b,O-3b} {l-1c,l-3d,l-4b,l-5b;O-1a,O-2b,O-3b}
{O-1b,O-2a,O-3a}	{l-1a,l-2c,l-3a,l-4a;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1a,l-2c,l-3b,l-4a;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1a,l-2c,l-3c,l-4a;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1a,l-2c,l-3d,l-4a,l-5a;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2b,l-3a,l-4a;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2b,l-3b,l-4b;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2b,l-3b,l-4a;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2b,l-3c,l-4a;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2b,l-3d,l-4a,l-5a;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2c,l-3a,l-4a;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2c,l-3a,l-4b;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2c,l-3b,l-4a;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2c,l-3c,l-4a;O-1b,O-2a,O-3a} {l-1b,l-2c,l-3d,l-4a,l-5a;O-1b,O-2a,O-3a}
{O-1b,O-2a,O-3b}	{l-1a,l-2c,l-3d,l-4a,l-5b;O-1b,O-2a,O-3b} {l-1b,l-2b,l-3d,l-4a,l-5b;O-1b,O-2a,O-3b} {l-1b,l-2c,l-3d,l-4a,l-5b;O-1b,O-2a,O-3b}
{O-1b,O-2b,O-3a}	{l-1a,l-2c,l-3a,l-4b;O-1b,O-2b,O-3a} {l-1a,l-2c,l-3b,l-4b;O-1b,O-2b,O-3a} {l-1a,l-2c,l-3c,l-4b;O-1b,O-2b,O-3a} {l-1a,l-2c,l-3d,l-4b,l-5a;O-1b,O-2b,O-3a} {l-1b,l-2b,l-3b,l-4b;O-1b,O-2b,O-3a} {l-1b,l-2b,l-3c,l-4b;O-1b,O-2b,O-3a} {l-1b,l-2b,l-3d,l-4b,l-5a;O-1b,O-2b,O-3a} {l-1b,l-2c,l-3b,l-4b;O-1b,O-2b,O-3a} {l-1b,l-2c,l-3c,l-4b;O-1b,O-2b,O-3a} {l-1b,l-2c,l-3d,l-4b,l-5a;O-1b,O-2b,O-3a}
{O-1b,O-2b,O-3b}	{l-1a,l-2c,l-3d,l-4b,l-5b;O-1b,O-2b,O-3b} {l-1b,l-2b,l-3d,l-4b,l-5b;O-1b,O-2b,O-3b} {l-1b,l-2c,l-3d,l-4b,l-5b;O-1b,O-2b,O-3b}

机票补偿费用(airfare)、其他补偿费用(other expenses)、偿付公司的额外英里数费用(fee for the use of car)这三个范畴的不同 choice 组合所对应的 amount 的情况，如表 5-44 所示：

**表 5-44 O-choice 组合所对应的最终输出 amount 的情况**

组合编号	O-choices	满足 O-choices 组合时最终输出 amount 的情况
1	{ O-1a, O-2a, O-3a }	amount = 0
2	{ O-1a, O-2a, O-3b }	amount > 0
3	{ O-1a, O-2b, O-3a }	amount > 0
4	{ O-1a, O-2b, O-3b }	amount > 0
5	{ O-1b, O-2a, O-3a }	amount < 0
6	{ O-1b, O-2a, O-3b }	amount = 0、amount > 0、amount < 0 皆有可能
7	{ O-1b, O-2b, O-3a }	amount = 0、amount > 0、amount < 0 皆有可能
8	{ O-1b, O-2b, O-3b }	amount = 0、amount > 0、amount < 0 皆有可能

按照 METRIC\* 的流程对这个实例进行蜕变关系识别：

#### 1. 组内比较：

在进行同组内的每对不同完整测试帧蜕变关系识别时，我们首先可以发现：对于上表中 1 组来说，实际意义相当好。从 1 组 O-choice 组合我们可以得到  $r_f$ ：当月补偿费用（amount）不产生变化且等于零。从这个组中随意选择两个测试帧记为 IO-CTF<sub>11</sub> 和 IO-CTF<sub>12</sub>，则其中的蜕变关系是当输入由 IO-CTF<sub>11</sub> 的输入转化为 IO-CTF<sub>12</sub> 的输入时，IO-CTF<sub>11</sub> 的输出结果 amount<sub>11</sub> 与 IO-CTF<sub>12</sub> 的输出结果 amount<sub>12</sub> 相等且等于 0。

举例：

选择 1 组中{l-1a, l-2a, l-3a, l-4a;O-1a,O-2a,O-3a}与{l-1a, l-2a, l-3b, l-4a;O-1a,O-2a,O-3a}进行比较。通过比较两个测试帧的输入 choice 组合，我们可以得到输入变化关系  $r$ ：员工等级为高级销售经理，当月销售额  $s$  满足  $0 \leq s < 50,000$ ，当月申请的机票补偿费用为 0，当月车辆使用英里  $y$  数由  $0 \leq y \leq 3,000$  变化到  $3,000 < y \leq 4,000$ 。结合  $r_f$ ，我们可以得到以下蜕变关系：在员工等级为高级销售经理、当月销售额  $s$  满足  $0 \leq s < 50,000$ 、当月申请的机票补偿费用为 0、当月车辆使用英里  $y$  数由  $0 \leq y \leq 3,000$  变化到  $3,000 < y \leq 4,000$  的情况下，当月补偿费用不会产生变化且等于 0。用 IO-CTF 表示如表 5-45 所示：

表 5-45 组内测试帧对比得到的蜕变关系举例

r	r <sub>f</sub>
{l-1a, l-2a, l-3a, l-4a;O-1a,O-2a,O-3a}--> { l-1a, l-2a, l-3b, l-4a;O-1a,O-2a,O-3a}	amount* = amount = 0

对于 2 至 7 组，组内测试帧比较无法得出输出变化关系。通过比较仅仅能得知两个测试帧所分别对应的输出都满足大于 0，但是两个测试帧的输出之间的变化关系我们得不到。

## 2. 组间比较：

举例：

将{O-1a,O-2a,O-3a}组与{O-1a,O-2b,O-3a}组进行比较，我们可以得到前者 O-choice 组合变化到后者 O-choice 组合的变化关系 r<sub>f</sub> 是：当月补偿费用（amount）增大。我们从{O-1a,O-2a,O-3a}组中选择一个完整测试帧{l-1a, l-2a, l-3b, l-4a;O-1a,O-2a,O-3a}，从{O-1a,O-2b,O-3a}组中选择一个完整测试帧{l-1a, l-2a, l-3c, l-4b;O-1a,O-2b,O-3a}。对比输入组合我们可以得到从前者输入到后者输入的变化关系 r：员工等级为 senior sales manager，当月车辆使用英里数 y 满足  $0 \leq y \leq 3,000$ ，当月销售额度 s 由  $50,000 \leq s < 80,000$  变化至  $80,000 \leq s < 100,000$ ，当月申请的机票补偿费用由 0 变化为大于 0。将 r<sub>f</sub> 与 r 结合我们即可得到以下蜕变关系：在员工等级为 senior sales manager、当月车辆使用英里数 y 满足  $0 \leq y \leq 3,000$ 、当月销售额度 s 由  $50,000 \leq s < 80,000$  变化至  $80,000 \leq s < 100,000$ 、当月申请的机票补偿费用由 0 变化为大于 0 的情况下，当月补偿费用增大。用 IO-CTF 表示如表 5-46 所示：

表 5-46 组间测试帧对比得到的蜕变关系举例

r	r <sub>f</sub>
{l-1a, l-2a, l-3b, l-4a;O-1a,O-2a,O-3a}--> { l-1a, l-2a, l-3c, l-4b;O-1a,O-2b,O-3a}	amount* > amount

首先选取两个 O-choice 组合存在变化关系的组，得出 O-choice 组合存在的变化关系 r<sub>f</sub>，再分别从两个组中选择一个测试帧，比较得出输入的变化关系 r。将 r 与 r<sub>f</sub> 结合即可得到蜕变关系。存在输出变化关系的候选组，如表 5-47 所示：

表 5-47 存在输出变化关系的候选组

存在输出变化关系的候选组	第一个组中完整测试帧数目	第二个组中完整测试帧数目	蜕变关系系数	$r_f$ (第一组变化到第二组)
{O-1a,O-2a,O-3a}与{O-1a,O-2a,O-3b}	19	4	76	amount* > amount
{O-1a,O-2a,O-3a}与{O-1a,O-2b,O-3a}	19	13	247	amount* > amount
{O-1a,O-2a,O-3a}与{O-2a,O-2b,O-3b}	19	4	76	amount* > amount
{O-1a,O-2a,O-3a}与{O-3b,O-2a,O-3a}	19	14	266	amount* < amount

在组内比较中，共生成 5 个候选组，465 个候选对。在组间比较过程中，共生成 4 个候选组，665 个候选对。共计 9 个候选组，1130 个候选对。

#### 5.5.4 结论

回答问题 1：在费用补偿系统的实例研究中，METRIC\*成功识别出了该对象中的蜕变关系。METRIC\*被证明是可行的。

回答问题 2：对于费用补偿系统，METRIC 需要比较的候选对的数目为 2145，而 METRIC\*需要比较的候选对数目为 1017。后者需要比较的候选对数目大大少于前者，说明 METRIC\*能够剔除无用候选对，有效减少对无用候选对进行判断的情况。

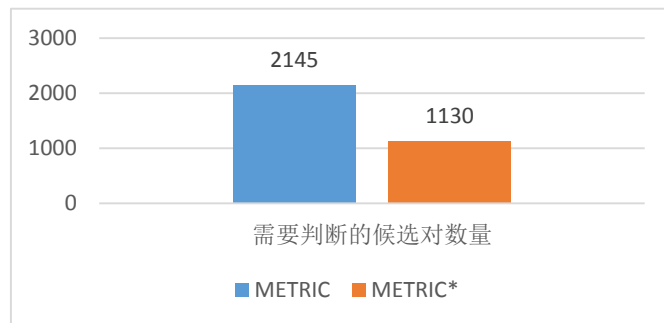


图 5-3 费用补偿系统 METRIC 与 METRIC\*比较

METRIC\*方法能够更加高效地选择两个测试帧组成有用的 candidate pair 进行对比，极大减少了 METRIC 方法中出现的对比无用 candidate pair 的情况，从而进一步提高了蜕变关系识别的效率。对比的步骤有很多重复的部分，我认为开发支持工具能进一步发挥 METRIC\*的优势。



## 5.6 实例研究四：订餐系统 MOS

### 5.6.1 规格描述

MOS 被航空餐饮公司用来确定该公司服务的飞机所需要准备和装载的每种类型餐饮和其他特殊要求食物的量。

对于每一架航班，MOS 会产生一个称为“餐饮安排计划报告”（MSR），报告中包含各种各样有关不同舱位餐饮数量的信息：

- （1） 头等舱餐饮数目；
- （2） 商务舱餐饮数目；
- （3） 经济舱餐饮数目；
- （4） 乘务人员餐饮数目；
- （5） 飞行员餐饮数目；
- （6） 儿童餐饮数目；
- （7） 花的数目；

对于一架航班，MOS 需要以下信息来生成 MSR：

- （1） 航班的飞机模型。不同飞机模型存在不同的配置。在 MOS 中，我们假定系统数据库中存在五种模型。表 5-48 对飞机模型进行了详细阐述：

表 5-48 MOS 系统中飞机模型描述

Aircraft model	# of first class seats	# of business class seats	# of economic class seats	# of crew members	# of pilots
747200	0	20	150	10	2
747300	5	25	200	12	3
747400	10	30	240	14	3
000200	0	35	210	13	2
000300	10	40	215	14	3

在上表中第一列，前三个数字的含义是模型的系列，“747”代表波音，“000”代表空中客车；后三个数字的含义是特定系列下的子模型；

- （2） 乘务人员数量（# of crew numbers）是否有变化。如果有变化，则新的数字（大于 0）必须给出，同时这个新的数字将会使用，而不是默认的相关飞机模型的乘务人员数量；

- (3) 飞行员的数量 (# of pilots) 是否有变化。如果有变化, 必须给出新的数字, 同时这个新的数字将会使用, 而不是默认的相关飞机模型的飞行员数量;
- (4) 儿童乘客的数量 (大于等于 0);
- (5) 需要的花的数量 (大于等于 0)。

除了以上的信息, MOS 存在下列假设:

- (1) 每架航班提供两种餐饮;
- (2) 儿童乘客不占用任何座位;
- (3) 假定每架航班被成年乘客全部预订, 所以座位的数量等于在飞机上的成年乘客的数量;

根据以上假设, 每种舱位餐饮的数量是当前舱位座位数的两倍, 儿童餐饮的数量是相对应的儿童乘客数量的两倍, 但需要的花的数目等于相对应的需求数量。

## 5.6.2 使用 METRIC 识别蜕变关系

METRIC 框架使用 CHOC’LATE 测试用例生成方法产生的完整测试帧并识别蜕变关系, 故需要先生成测试对象的测试帧。

**完整测试帧生成:**

生成测试帧主要经历以下三个步骤:

### 1. 划分范畴和选项:

测试人员首先鉴别出对软件执行行为有影响的输入参数或环境条件。输入参数或环境条件被定义为范畴(category)。每一个范畴被进一步划分为不同的选项(choice), 选项代表着其所属范畴可能产生的不同情况。订餐系统的范畴和选项划分如表 5-49 所示:

**表 5-49 MOS 范畴选项划分**

Categories	Choices
1. Aircraft model	1a. 747200
	1b. 747300
	1c. 747400
	1d. 000200
	1e. 000300
2. Change in the number of crew members	2a yes
	2b. no

表 5-49 MOS 范畴选项划分（续）

Categories	Choices
3. Number of crew(crewNum)	3a. crewNum > default value
	3b. crewNum = default value
	3c. crewNum < default value
4. Change in the number of pilots	4a. yes
	4b. no
5. Number of pilots(pilotNum)	5a. pilotNum > default value
	5b. pilotNum = default value
	5c. pilotNum < default value
6. Number of Child Passengers(childNum)	6a. childNum > 0
	6b. childNum = 0
7. Number of bundles of flowers(flowerNum)	7a. flowerNum > 0
	7b. flowerNum = 0

2. 确定每对选择之间的关系并记录至选择关系表，如表 5-50 所示：

表 5-50 选择关系表

	1a	1b	1c	1d	1e	2a	2b	3a	3b	3c	4a	4b	5a	5b	5c	6a	6b	7a	7b
1a	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1c	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1d	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1e	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2a	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3a	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3c	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4a	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5a	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
5c	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6a	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
6b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7a	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
7b	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3. 使用选择关系表生成完整测试帧

完整测试帧是选择的集合，这个集合包含每个范畴其中的一个选项，即完整测试帧是通过在每个范畴选择一个选项再根据选择关系表中选择的关系进行组合得到的。MOS 的部分完整测试帧如表 5-51 所示：

表 5-51 MOS 部分完整测试帧

{1a,2a,3a,4a,5a,6a,7a}	{1a,2a,3a,4a,5a,6a,7b}	{1a,2a,3a,4a,5a,6b,7a}
{1a,2a,3a,4a,5a,6b,7b}	{1a,2a,3a,4a,5c,6a,7a}	{1a,2a,3a,4a,5c,6a,7b}
{1a,2a,3a,4a,5c,6b,7a}	{1a,2a,3a,4a,5c,6b,7b}	{1a,2a,3a,4b,5b,6a,7a}
{1a,2a,3a,4b,5b,6a,7b}	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7a}	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b}
{1a,2a,3c,4a,5a,6a,7a}	{1a,2a,3c,4a,5a,6a,7b}	{1a,2a,3c,4a,5a,6b,7a}
{1a,2a,3c,4a,5a,6b,7b}	{1a,2a,3c,4a,5c,6a,7a}	{1a,2a,3c,4a,5c,6a,7b}
{1a,2a,3c,4a,5c,6b,7a}	{1a,2a,3c,4a,5c,6b,7b}	{1a,2a,3c,4b,5b,6a,7a}
{1a,2a,3c,4b,5b,6a,7b}	{1a,2a,3c,4b,5b,6b,7a}	{1a,2a,3c,4b,5b,6b,7b}
{1a,2b,3b,4a,5a,6a,7a}	{1a,2b,3b,4a,5a,6a,7b}	{1a,2b,3b,4a,5a,6b,7a}
{1a,2b,3b,4a,5a,6b,7b}	{1a,2b,3b,4a,5c,6a,7a}	{1a,2b,3b,4a,5c,6a,7b}
{1a,2b,3b,4a,5c,6b,7a}	{1a,2b,3b,4a,5c,6b,7b}	{1a,2b,3b,4b,5b,6a,7a}
{1a,2b,3b,4b,5b,6a,7b}	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7a}	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b}

完整测试帧生成完毕后，将所有完整测试帧作为输入提供给 METRIC 的支持工具 MR-GEN 进行蜕变关系识别。

#### 蜕变关系识别：

按照 METRIC 蜕变关系识别的三个步骤，对 MOS 进行蜕变关系识别。部分蜕变关系如表 5-52 所示。其中，↑表示增大，→表示不变，↓表示减少。

表 5-52 使用 METRIC 方法得到的部分蜕变关系

蜕变关系序号	r	cmMealNum 变化	pMealNum 变化	cpMealNum 变化	flowerNum 变化
1	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4b,5b,6b,7a}	→	→	→	↑
2	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4b,5b,6a,7b}	→	→	↑	→
3	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4b,5b,6a,7a}	→	→	↑	↑
4	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5a,6b,7b}	→	↑	→	→
5	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5a,6b,7a}	→	↑	→	↑
6	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5a,6a,7b}	→	↑	↑	→
7	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5a,6a,7a}	→	↑	↑	↑

表 5-52 使用 METRIC 方法得到的部分蜕变关系（续）

蜕变关系序号	r	cmMealNum 变化	pMealNum 变化	cpMealNum 变化	flowerNum 变化
8	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5c,6b,7b}	→	↓	→	→
9	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5c,6b,7a}	→	↓	→	↑
10	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5c,6a,7b}	→	↓	↑	→
11	{1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5c,6a,7a}	→	↓	↑	↑
12	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4b,5b,6b,7b}	↑	→	→	→
13	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4b,5b,6b,7a}	↑	→	→	↑
14	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4b,5b,6a,7b}	↑	→	↑	→
15	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4b,5b,6a,7a}	↑	→	↑	↑
16	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5a,6b,7b}	↑	↑	→	→
17	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5a,6b,7a}	↑	↑	→	↑
18	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5a,6a,7b}	↑	↑	↑	→
19	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5a,6a,7a}	↑	↑	↑	↑
20	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5c,6b,7b}	↑	↓	→	→
21	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5c,6b,7a}	↑	↓	→	↑
22	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5c,6a,7b}	↑	↓	↑	→
23	{1a,2a,3a,4b,5b,6b,7b} --> {1a,2b,3b,4a,5c,6a,7a}	↑	↓	↑	↑

注：影响乘务人员餐饮数目的输入量为乘务人员变动数目，影响飞行员餐饮数目的出入量为飞行员变动数目，影响儿童餐饮数目的输入量为儿童数目，影响花的数目的输入量为花的需求量。由于乘务人员变动数目、飞行员变动数目、儿童数目、花的需求量互不相关，他们之间的组合所产生的蜕变关系数量众多，不再一一列出。

过程共生成 16110 个候选对，如果要得到全部蜕变关系需要对全部 16110 个候选对进行判断。

### 5.6.3 使用 METRIC\*识别蜕变关系

METRIC\*使用了包含输入范畴(I-category)和选项(I-choice)与输出范畴(O-category)和选项(O-choice)的测试帧识别蜕变关系。需要首先使用 CHOC' LATE-DIP 生成包含输入输出的测试帧。

**完整测试帧生成：**

生成测试帧主要经历以下三个步骤：

**1. 划分范畴和选项。**

测试人员不仅需要鉴别出对软件执行行为有影响的输入参数或环境条件并定义范畴和选项，还需要鉴别出程序不同的输出情景并定义范畴和选项。MOS 的范畴和选项划分如表 5-53 和 5-54 所示：

**表 5-53 MOS 的输入范畴选择划分**

I-categories	I-choices
I-1. Aircraft model	I-1a. 747200
	I-1b. 747300
	I-1c. 747400
	I-1d. 000200
	I-1e. 000300
I-2. Change in the number of crew members	I-2a. yes
	I-2b. no
I-3. Number of crew(crewNum)	I-3a. crewNum > default value
	I-3b. crewNum = default value
	I-3c. crewNum < default value
I-4. Change in the number of pilots	I-4a. yes
	I-4b. no
I-5. Number of pilots(pilotNum)	I-5a. pilotNum > default value
	I-5b. pilotNum = default value
	I-5c. pilotNum < default value
I-6. Number of child Passengers(childNum)	I-6a. childNum > 0
	I-6b. childNum = 0
I-7. Number of bundles of flowers(flowerNum)	I-7a. flowerNum > 0
	I-7b. flowerNum = 0

表 5-54 输出的范畴选项划分

Output	O-category	O-choice
Meal schedule report	O-1.Number of crew members' meals(cmMealNum)	O-1a. cmMealNum > 2*default value
		O-1b. cmMealNum = 2*default value
		O-1c. cmMealNum < 2*default value
	O-2.Number of pilots' meals(pMealNum)	O-2a. pMealNum > 2* default value
		O-2b. pMealNum = 2* default value
		O-2c. pMealNum < 2* default value
	O-3.Number of child passengers'meals(cp MealNum)	O-3a. cpMealNum > 0
		O-3b.cpMealNum = 0
	O-4.Number of bundles of flowers(flowerNum)	O-4a.flowerNum > 0
		O-4b.flowerNum = 0
	O-5. Aircraft model	O-5a. 747200
		O-5b. 747300
		O-5c. 747400
		O-5d. 000200
		O-5e. 000300
	O-6.Number of first class meals	O-6a. 0
		O-6b. 5
		O-6c. 10
	O-7.Number of business class meals	O-7a. 20
		O-7b. 25
		O-7c. 30
		O-7d. 35
		O-7e. 40
	O-8.Number of economic class meals	O-8a. 150
		O-8b. 200
		O-8c. 210
		O-8d. 215
		O-8e. 240

将 aircraft model 加入 O-category 并作为 IO-CTF 分组依据的原因：若仅仅按 O-1、O-2、O-3 与 O-4 的选项组合进行分组的话，我们会发现，每个组中的完整测试帧仅仅飞机模型不同。在这种情况下如果进行组内比较，我们仅仅能知道组内两个测试帧的输出结果与 default value 有关，但输出的变化得不到。如果要得到输出变化必须再从规格说明中对不同模型的 default value 进行比较才，这样就加重的工作的复杂度。进行组间比较没有实际意义，原因是如果从两个组分别选取的测试帧具有不同飞机型号，那么比较时会具有

两个变化的部分，一个是飞机模型的差别，一个是组与组之间的差别，更加无法进行比较。故将飞机模型作为 IO-CTF 的分类标准，尽量可以使具有相同飞机型号的 IO-CTF 进行比较；但是在这个例子里由于输出选项之间的约束条件不存在，造成的结果是输出 choice 之间随意组合都有效，并且一个 IO-CTF 就是一个分类。

2. 建立同时包含 I-choice 和 O-choice 的选择关系表，并且将选择之间的关系记录进入选择关系表中。

我们可以直接通过 I-1、I-3、I-5、I-6 和 I-7 分别推知 O-5、O-1、O-2、O-3 和 O-4 的选项，故构建扩展的选择关系表十分简单。

3. 使用扩展的选择关系表生成 IO-CTF。

MOS 的部分 IO-CTF 如表 5-55 所示：

表 5-55 MOS 的部分 IO-CTF

{I-1a,I-2a,I-3a,I-4a,I-5a,I-6a,I-7a;O-1a,O-2a,O-3a,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2a,I-3a,I-4a,I-5a,I-6b,I-7a;O-1a,O-2a,O-3b,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2a,I-3a,I-4a,I-5c,I-6a,I-7a;O-1a,O-2c,O-3a,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2a,I-3a,I-4a,I-5c,I-6b,I-7a;O-1a,O-2c,O-3b,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2a,I-3a,I-4b,I-5b,I-6a,I-7a;O-1a,O-2b,O-3a,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2a,I-3a,I-4b,I-5b,I-6b,I-7a;O-1a,O-2b,O-3b,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2a,I-3c,I-4a,I-5a,I-6a,I-7a;O-1c,O-2a,O-3a,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2a,I-3c,I-4a,I-5a,I-6b,I-7a;O-1c,O-2a,O-3b,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2a,I-3c,I-4a,I-5c,I-6a,I-7a;O-1c,O-2c,O-3a,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2a,I-3c,I-4a,I-5c,I-6b,I-7a;O-1c,O-2c,O-3b,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2a,I-3c,I-4b,I-5b,I-6a,I-7a;O-1c,O-2b,O-3a,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2a,I-3c,I-4b,I-5b,I-6b,I-7a;O-1c,O-2b,O-3b,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2b,I-3b,I-4a,I-5a,I-6a,I-7a;O-1b,O-2a,O-3a,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2b,I-3b,I-4a,I-5a,I-6b,I-7a;O-1b,O-2a,O-3b,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2b,I-3b,I-4a,I-5c,I-6a,I-7a;O-1b,O-2c,O-3a,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2b,I-3b,I-4a,I-5c,I-6b,I-7a;O-1b,O-2c,O-3b,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2b,I-3b,I-4b,I-5b,I-6a,I-7a;O-1b,O-2b,O-3a,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}
{I-1a,I-2b,I-3b,I-4b,I-5b,I-6b,I-7a;O-1b,O-2b,O-3b,O-4a,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a}

测试帧生成完毕后，按照 METRIC\*方法的步骤，我们将对联通计费服务进行蜕变关系识别。

蜕变关系识别：

为了寻找输出之间的变化关系，表 5-56 列出了包含乘务人员变动数目、飞



行员变动数目、儿童数目及花的需求量四个范畴的选项组合所对应的乘务人员餐饮数目、飞行员餐饮数目、儿童餐饮数目与花的数目的情况：

**表 5-56 乘务人员变动数目、飞行员变动数目、儿童数目及花的需求量四个范畴的选项组合所对应的乘务人员餐饮数目、飞行员餐饮数目、儿童餐饮数目与花的数目的情况**

Combination of O-choices	number of crew numbers' meals	number pilots' meals	number child passengers' meals	number of bundles of flowers
O-1a,O-2a,O-3a,O-4a	>default number	>default number	>0	>0
O-1a,O-2a,O-3a,O-4b	>default number	>default number	>0	=0
O-1a,O-2a,O-3b,O-4a	>default number	>default number	=0	>0
O-1a,O-2a,O-3b,O-4b	>default number	>default number	=0	=0
O-1a,O-2b,O-3a,O-4a	>default number	=default number	>0	>0
O-1a,O-2b,O-3a,O-4b	>default number	=default number	>0	=0
O-1a,O-2b,O-3b,O-4a	>default number	=default number	=0	>0
O-1a,O-2b,O-3b,O-4b	>default number	=default number	=0	=0
O-1a,O-2c,O-3a,O-4a	>default number	<default number	>0	>0
O-1a,O-2c,O-3a,O-4b	>default number	<default number	>0	=0
O-1a,O-2c,O-3b,O-4a	>default number	<default number	=0	>0
O-1a,O-2c,O-3b,O-4b	>default number	<default number	=0	=0
O-1b,O-2a,O-3a,O-4a	=default number	>default number	>0	>0
O-1b,O-2a,O-3a,O-4b	=default number	>default number	>0	=0
O-1b,O-2a,O-3b,O-4a	=default number	>default number	=0	>0
O-1b,O-2a,O-3b,O-4b	=default number	>default number	=0	=0
O-1b,O-2b,O-3a,O-4a	=default number	=default number	>0	>0
O-1b,O-2b,O-3a,O-4b	=default number	=default number	>0	=0
O-1b,O-2b,O-3b,O-4a	=default number	=default number	=0	>0
O-1b,O-2b,O-3b,O-4b	=default number	=default number	=0	=0
O-1b,O-2c,O-3a,O-4a	=default number	<default number	>0	>0
O-1b,O-2c,O-3a,O-4b	=default number	<default number	>0	=0
O-1b,O-2c,O-3b,O-4a	=default number	<default number	=0	>0
O-1b,O-2c,O-3b,O-4b	=default number	<default number	=0	=0
O-1c,O-2a,O-3a,O-4a	<default number	>default number	>0	>0
O-1c,O-2a,O-3a,O-4b	<default number	>default number	>0	=0
O-1c,O-2a,O-3b,O-4a	<default number	>default number	=0	>0
O-1c,O-2a,O-3b,O-4b	<default number	>default number	=0	=0
O-1c,O-2b,O-3a,O-4a	<default number	=default number	>0	>0
O-1c,O-2b,O-3a,O-4b	<default number	=default number	>0	=0

**表 5-56 乘务人员变动数目、飞行员变动数目、儿童数目及花的需求量四个范畴的选项组合所对应的乘务人员餐饮数目、飞行员餐饮数目、儿童餐饮数目与花的数目的情况（续）**

Combination of O-choices	number of crew numbers' meals	number pilots' meals	number child passengers' meals	number of bundles of flowers
O-1c,O-2b,O-3b,O-4a	<default number	=default number	=0	>0
O-1c,O-2b,O-3b,O-4b	<default number	=default number	=0	=0
O-1c,O-2c,O-3a,O-4a	<default number	<default number	>0	>0
O-1c,O-2c,O-3a,O-4b	<default number	<default number	>0	=0
O-1c,O-2c,O-3b,O-4a	<default number	<default number	=0	>0
O-1c,O-2c,O-3b,O-4b	<default number	<default number	=0	=0

注：O-1b, O-2b, O-3b, O-4b 相对于默认条件无变化，可以作为比较的基准。

对于 MOS 这个例子，我们 METRIC\*的思想进行蜕变关系识别时会经历比较麻烦的步骤。从表 8-55 中，我们可以看出，每个 IO-CTF 的输出选项组合都不相同，即每个 IO-CTF 自成一个类，即测试帧分类共有 180 个。造成这么多分类的原因是：输出选项组合与输入选项组合之间的关系是一一对一，使得具有相同输出组合的 IO-CTF 不存在。在这种情况下 METRIC\*方法的工作量就与 METRIC 的工作量相同，甚至更多一些。

组内测试帧比较得出蜕变关系不可行，因为每个组内仅有一个测试帧，无法进行比较。

对于组与组之间的比较，就完全成为了一个测试帧与另一个测试帧之间的比较。

举例：

我们选择两个飞机模型相同，其他选项不同的两个组。这两个组的输出选项组合如表 5-57 所示：

**表 5-57 组间蜕变关系识别选取的候选组举例**

Combination of aircraft model and O-choices	Number of						
	crew numbers' meals	pilots' meals	child passengers' meals	bundles of flowers	first-class meals	business-class meals	economic
O-1b,O-2b,O-3b,O-4b,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a	=default number	=default number	=0	=0	0	20	150
O-1b,O-2c,O-3a,O-4b,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a	=default number	<default number	>0	=0	0	20	150

比较两个 O-choices 组合，我们得到后者相对于前者的变化是：飞机模型为 747200、乘务人员餐饮数量不变且等于 default number、飞行员餐饮数量减少、儿童餐饮数量增多、花朵数量不变、头等舱餐饮数量不变、商务舱餐饮数目不变、经济舱餐饮数目不变。

这两个组对应的 IO-CTF 如表 5-58 所示：

表 5-58 对应的完整测试帧

Combination of aircraft model and O-choices	Complete test frame
O-1b,O-2b,O-3b,O-4b,O-5a, O-6a,O-7a,O-8a	{ I-1a, I-2b, I-3b, I-4b, I-5b, I-6b, I-7b;O-1b,O-2b,O-3b,O-4b,O-5a, O-6a,O-7a,O-8a }
O-1b,O-2c,O-3a,O-4b,O-5a, O-6a,O-7a,O-8a	{ I-1a, I-2b, I-3b, I-4a, I-5c, I-6a, I-7b;O-1b,O-2c,O-3a,O-4b,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a }

通过对比 IO-CTF 并结合上述两个测试帧 O-choices 组合之间的变化关系，我们不难得到如下蜕变关系：在飞机模型为 747200、乘务人员数量不变、飞行员数量减少、儿童数量增多、花朵数量不变的情况下，飞行员餐饮数量减少、儿童餐饮数量增多、头等舱餐饮数量不变、商务舱餐饮数目不变、经济舱餐饮数目不变。

在组间比较过程中，共生成 16110 个候选组，16110 个候选对。

从以上例子我们可以看出，在 I-choice 组合与 O-choice 组合一一对应的情况下，METRIC\*方法无法体现出它的优势。

5.6.4 结论

回答问题 1：在订餐系统实例研究中，METRIC\*成功识别出了该对象中的蜕变关系。METRIC\*被证明是可行的。

回答问题 2：对于订餐系统，METRIC 需要比较的候选对的数目为 16110，而 METRIC\*需要比较的候选对数目为 16110。后者需要比较的候选对数目与前者完全相等。在这个实例中 METRIC\*未能减少需要比较的候选对的数目。其原因是该实例中不存在没有蜕变关系的候选对，故不能减少需要比较的候选对的数目。

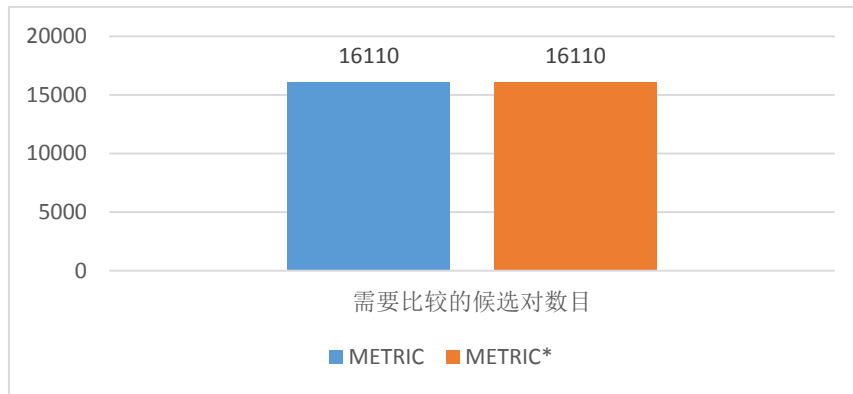


图 5-4 订餐系统 METRIC 与 METRIC\*比较

通过以上结果我们可以看出，METRIC\*并不适合这个例子。其原因是 MOS 的 O-choice 组合与 I-choice 组合一一对应，在这种情况下，每一个完整测试帧的输出组合都不一样，即每个测试帧就是一个组，组与组之间的对比就成为了测试帧与测试帧之间的对比，就完全成为了 METRIC 的比较方法，而且 METRIC\*多了判断输出变化关系这一步。故 METRIC\*在这个例子上的工作量更大。

## 5.7 实验结果与分析

实验结果分析将围绕回答研究问题与分析 METRIC\*适用情况展开。

**回答问题 1:** METRIC\*能够成功识别出四个实验对象中的蜕变关系。得到的结论是 METRIC\*是可行的。

**回答问题 2:** 在能够得出所有蜕变关系的情况下，METRIC\*能够减少联通计费服务、航空行李托运计费服务与费用补偿系统所需要识别的候选对的数量，而对于订餐系统则无法减少需要识别的候选对的数量。从整体来看，得到的结论是 METRIC\*方法可以有效剔除没有用的候选对，减少需要识别的候选对的数量。

**METRIC\*能够减少对无效候选对判断的情形：**

在 I-choice 组合与 O-choice 组合一一对应的情况下，METRIC\*不能够减少对无效候选对进行判断的情况，无法体现出体现出它所具备的优势；在 I-choice 组合与 O-choice 组合的关系为多对一时才能体现出它在有用候选对选择上的优势。

## 6 蜕变关系故障检测能力相关问题研究

通过上述四个实例研究，验证了 METRIC\* 的可行性以及 METRIC\* 对 METRIC 的改进。本章对蜕变关系集的故障检测能与构建高故障检测能力蜕变关系集的方法进行研究。

### 6.1 研究问题

为研究由 METRIC\* 识别的蜕变关系的故障检测能力及对提升蜕变关系集生成的测试用例集故障检测能力的方法与构建高故障检测能力蜕变关系集的方法进行研究，设计了以下研究问题：

1. **满足测试帧覆盖的蜕变关系集的故障检测能力怎样？** 针对该研究问题，为满足测试帧覆盖的蜕变关系集构造规模不同的测试用例集，并使用测试用例集测试所有变异体，计算测试用例集的变异得分，分析蜕变关系集的故障检测能力；
2. **测试用例生成方法是否影响蜕变关系集的故障检测能力？不同测试用例生成方法的成本效率如何？** 针对该研究问题，比较边界值分析法生成的测试用例集与随机值法生成的测试用例集的故障检测能力的差异。以随机值法为每个蜕变关系生成 1 个测试用例组成的测试用例集为基础，分别对不同方法生成的测试用例计算测试用例数目提升率与故障检测能力提升率的比，分析成本效率的差异；
3. **蜕变关系集的故障检测能力是否与蜕变关系集的多样性有关？** 对于该研究问题，构造一组规模相同但覆盖选择数目不同的蜕变关系集，分析这一系列蜕变关系集的变异得分和其覆盖选择的数目之间的关系，得到蜕变关系集的故障检测能力和其多样性的关系；
4. **由 METRIC\* 识别的蜕变关系难检出哪种类型的故障？** 针对该研究问题，统计所有未被杀死的变异体，观察这些变异体所具有的特征。

## 6.2 实验对象

本研究使用上述实例研究中四个实际程序作为实验对象，包括联通计费服务、航空行李托运计费服务、费用补偿系统和订餐系统。所有的实例程序都是用 Java 语言编写。表 6-1 总结了研究对象的基本信息。

表 6-1 实验对象

实验对象	Loc
BillCalculation	107
AirlinesBaggageBillingService	97
ExpenseReimbursementSystem	117
MealOrderingSystem	150

## 6.3 度量指标

### 6.3.1 变异得分

实验结果采用变异分析技术进行分析，度量指标选用变异得分（Mutation Score）。变异得分指的是用测试用例集 TC 能够杀死程序 P 的变异体数量占生成非等价变异体数量的百分比。其计算公式为：

$$MS(P, TC) = \frac{N_K}{N_M - N_E}$$

其中， $N_K$ 表示被杀死的变异体数量，变异体被杀死指的是测试用例集能够检测到变异体的故障， $N_M$ 表示总的变异体数量， $N_E$ 表示等价变异体数量。变异得分能有效地反映测试用例集的故障检测能力，测试用例集的变异得分越高，说明杀死的变异体数量越多，检测到的故障越多。

等价变异体指的是对于一个变异体，如果不存在任何测试用例使其与原程序的输出结果不相同，则称该变异体为等价变异体。本研究使用人工判断的方式找出变异体集合中的等价变异体。

### 6.3.2 蜕变关系的内部差异性

定义 5:（蜕变关系的内部差异性）

构成一个蜕变关系的两个测试帧之间的 CP 距离<sup>[22]</sup>称为该蜕变关系的内部差异性。

使用蜕变关系的内在差异性来评价构成蜕变关系的两个测试帧之间的差异。

举例：假设一个测试帧 $x$ 与一系列范畴 $A(x)$ 相关联，这一系列范畴所对应的选项是 $O(x)$ 。两个测试帧 $x_1$ 和 $x_2$ 之间的距离会以如下的方法计算：首先计算测试帧 $x_1$ 和 $x_2$ 选项的差集 $(O(x_1) \cup O(x_2)) \setminus (O(x_1) \cap O(x_2))$ 。然后，根据选项差集计算范畴的差集。 $x_1$ 和 $x_2$ 的 CP 距离即范畴差集中元素的个数。

### 6.3.3 蜕变关系集的多样性

对一个实验对象的输入域进行 category-choice 划分后，所有选项（choice）构成的集合为  $C$ ，所有的有效测试帧（test frame）构成的集合为  $T$ 。

测试帧是选项的集合，故  $T$  中每个元素都是  $C$  的子集。

候选对（candidate pair）由两个测试帧组成，将一个候选对表示为构成它的两个测试帧组成的集合。

对于一个选项集合  $A$ ，蜕变关系  $MR$  及其对应的候选对  $P = \{TF_1, TF_2\}$ ，

$MR$  覆盖  $A$  指  $TF_1 \cup TF_2 = A$ 。

蜕变关系集  $MRS = \{MR_1, MR_2, \dots, MR_n\}$ ，其中每个蜕变关系覆盖的选项的集合分别为  $A_1, A_2, \dots, A_n$ ， $MRS$  覆盖  $A$  指

$$\bigcup_{i=1}^n A_i = A$$

**定义 6:（蜕变关系集的多样性）**

蜕变关系集所覆盖的选项集合的大小称为蜕变关系集的多样性。

蜕变关系集的多样性反映的是蜕变关系集覆盖选项的多少。

## 6.4 实验步骤

### 6.4.1 变异体生成

实验中采用 JAVA 语言变异工具 MuJava 为待测程序生成变异体。该工具包含 19 种传统变异算子和 28 种类变异算子，但针对这四个实例程序只使用到了表 6-2 中的变异算子。

表 6-2 实验对象变异体相关信息

Object Program	Mutation Operator	Number of all mutants	Number of equivalent mutants and meaningless mutants
BillCalculation	AORB, AOIU, AOIS, ROR, COR, COI, LOI, SDL, VDL, ODL	210	38
AirlinesBaggageBillingService	AORB, AOIU, AOIS, ROR, COI, LOI, SDL, VDL, CDL, ODL	187	67
ExpenseReimbursementSystem	AORB, AOIU, AOIS, AOUD, ROR, COI, SDL, ODL	180	29
MealOrderingSystem	AORB, AOIU, AOIS, LOI, SDL, CDL, ODL, JSI	224	51

使用 MuJava 工具生成实验对象的变异体后，本研究通过人工方式识别每个实验对象的等价变异体。

## 6.4.2 蜕变关系识别

对实验对象的变异体进行测试时，使用的蜕变关系是由 METRIC\*识别的蜕变关系。四个实验对象蜕变关系的数目如表 6-3 所示：

表 6-3 实验对象蜕变关系统计

Object Program	Number of Candidate Groups	Number of MRs
BillCalculation	74	142
AirlinesBaggageBillingService	3	735
ExpenseReimbursementSystem	36	1130
MealOrderingSystem	16110	3512

前三个实验对象的候选组比较少，本研究通过人工定义的方式得到前三个实验对象的蜕变关系。第四个实验对象的候选组较多，通过人工定义的方式得到全部蜕变关系比较困难。本研究通过下述的方式获取全部的蜕变关系：

想法：类比于 CHOC' LATE 中的 Choice Relation Table，能不能构建一个变化关系表，其中每个单元格内容的是，当该单元格所在横行代表的 choice 变化到该单元格所在纵列代表的 choice 时，输出所发生的变化。这样，在判断两个 O-choice 组合对应的输出之间的变化关系时，就能够根据这个变化关系表来确定两个 O-choice 组合对应的输出之间的存在的变化关系。

过程：



1. 找到能够影响某一个输出 P 的所有 O-category;
2. 对于这些 O-category, 从每一个 O-category 对应的 O-choice 集合中选择一个 O-choice, 将这些选择出来的 O-choice 放在一起形成一个集合;
3. 重复 2, 找到所有的 O-choice 集合;
4. 对于所有的 O-choice 集合, 从中选取两个集合 O-choice 集合 A 与 O-choice 集合 B, 判断从 O-choice 集合 A 变化到 O-choice 集合 B 时, 输出 P 所发生的变化;
5. 重复 4, 直到每一个 O-choice 集合与其他所有 O-choice 集合都进行过 4 步骤的判断;
6. 将所有的变化关系汇总, 构成变化关系表;
7. 对候选组的两个 O-choice 组合进行对比时, 分别从两个 O-choice 组合中各找到影响输出 P 的 O-choice 集合。根据变化关系表找到这两个 O-choice 集合对应的输出 P 所发生的变化。

对于多个输出的情况, 只需要对每个输出按上述步骤执行一遍即可。

#### 举例:

对于 MOS 这个程序, 我们划分了如表 6-4 所示的 O-category 和 O-choice。

**表 6-4 MOS 输出 category 与 choice 划分**

Output	O-category	O-choice
Meal schedule report	O-1.Number of crew members' meals(cmMealNum)	O-1a. cmMealNum > 2*default value
		O-1b. cmMealNum = 2*default value
		O-1c. cmMealNum < 2*default value
	O-2.Number of pilots' meals(pMealNum)	O-2a. pMealNum > 2* default value
		O-2b. pMealNum = 2* default value
		O-2c. pMealNum < 2* default value
	O-3.Number of child passengers' meals(cp MealNum)	O-3a. cpMealNum > 0
		O-3b.cpMealNum = 0
	O-4.Number of bundles of flowers(flowerNum)	O-4a.flowerNum > 0
		O-4b.flowerNum = 0
	O-5. Aircraft model	O-5a. 747200
		O-5b. 747300
		O-5c. 747400
		O-5d. 000200
		O-5e. 000300
		O-8e. 240

**表 6-4 MOS 输出 category 与 choice 划分 (续)**

Output	O-category	O-choice
Meal schedule report	O-6.Number of first class meals	O-6a. 0
		O-6b. 5
		O-6c. 10
	O-7.Number of business class meals	O-7a. 20
		O-7b. 25
		O-7c. 30
		O-7d. 35
		O-7e. 40
	O-8.Number of economic class meals	O-8a. 150
		O-8b. 200
		O-8c. 210
		O-8d. 215
		O-8e. 240

根据规格说明书, MOS 输出的是一个 MSR 表, 其中包括七个参数。影响这个七个参数的 O-category 如表 6-5 所示:

**表 6-5 影响 MOS 输出的 O-category**

Output	O-category
Number of first-class meals	O-6
Number of business-class meals	O-7
Number of economic-class meals	O-8
Number of meals for crew members	O-1,O-5
Number of meals for pilots	O-2,O-5
Number of child meals	O-3
Number of bundles of flowers	O-4

为每一个输出参数建立一个变化关系表, 如表 6-7 至表 6-13 所示: (↑表示 increase , ↓表示 decrease , →表示 do not change, 0 表示 no relation)。

**表 6-7 Number of first-class meals 的变化关系表**

	O-6a	O-6b	O-6c
O-6a	→	↑	↑
O-6b	↓	→	↑
O-6c	↓	↓	→

**表 6-8 Number of business-class meals 的变化关系表**

	O-7a	O-7b	O-7c	O-7d	O-7e
O-7a	→	↑	↑	↑	↑
O-7b	↓	→	↑	↑	↑
O-7c	↓	↓	→	↑	↑
O-7d	↓	↓	↓	→	↑
O-7e	↓	↓	↓	↓	→

**表 6-9 Number of economic-class meals 的变化关系表**

	O-8a	O-8b	O-8c	O-8d	O-8a
O-8a	→	↑	↑	↑	↑
O-8b	↓	→	↑	↑	↑
O-8c	↓	↓	→	↑	↑
O-8d	↓	↓	↓	→	↑
O-8e	↓	↓	↓	↓	→

**表 6-10 Number of child meals 的变化关系表**

	O-3a	O-3b
O-3a	0	↓
o-3b	↑	→

**表 6-11 Number of bundles of flowers 的变化关系表**

	O-4a	O-4b
O-4a	0	↓
o-4b	↑	→

表 6-12 Number of meals for crew members 的变化关系表

	O-1a, O-5a	O-1a, O-5b	O-1a, O-5c	O-1a, O-5d	O-1a, O-5e	O-1b, O-5a	O-1b, O-5b	O-1b, O-5c	O-1b, O-5d	O-1b, O-5e	O-1c, O-5a	O-1c, O-5b	O-1c, O-5c	O-1c, O-5d	O-1c, O-5e
O-1a, O-5a	0	0	0	0	0	↓	0	0	0	0	↓	0	0	0	0
O-1a, O-5b	0	0	0	0	0	↓	↓	0	0	0	↓	↓	0	↓	0
O-1a, O-5c	0	0	0	0	0	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
O-1a, O-5d	0	0	0	0	0	↓	↓	0	↓	0	↓	↓	↓	↓	↓
O-1a, O-5e	0	0	0	0	0	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
O-1b, O-5a	↑	↑	↑	↑	↑	→	↑	↑	↑	↑	↑	0	0	0	0
O-1b, O-5b	0	↑	↑	↑	↑	↓	→	↑	↑	↑	↓	↓	0	0	0
O-1b, O-5c	0	0	↑	0	↑	↓	↓	→	↓	→	↓	↓	↓	↓	↓
O-1b, O-5d	0	0	↑	↑	↑	↓	↓	↑	→	↑	↓	↓	0	↓	0
O-1b, O-5e	0	0	↑	0	↑	↓	↓	→	↓	→	↓	↓	↓	↓	↓
O-1c, O-5a	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	0	0	0	0	0
O-1c, O-5b	0	↑	↑	↑	↑	0	↑	↑	↑	↑	0	0	0	0	0
O-1c, O-5c	0	0	↑	↑	↑	0	0	↑	0	↑	0	0	0	0	0
O-1c, O-5d	0	↑	↑	↑	↑	0	0	↑	↑	↑	0	0	0	0	0
O-1c, O-5e	0	0	↑	↑	↑	0	0	↑	0	↑	0	0	0	0	0

表 6-13 Number of meals for pilots 的变化关系表

	O-2a, O-5a	O-2a, O-5b	O-2a, O-5c	O-2a, O-5d	O-2a, O-5e	O-2b, O-5a	O-2b, O-5b	O-2b, O-5c	O-2b, O-5d	O-2b, O-5e	O-2c, O-5a	O-2c, O-5b	O-2c, O-5c	O-2c, O-5d	O-2c, O-5e
O-2a,O-5a	0	0	0	0	0	↓	0	0	↓	0	↓	↓	↓	↓	↓
O-2a,O-5b	0	0	0	0	0	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
O-2a,O-5c	0	0	0	0	0	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
O-2a,O-5d	0	0	0	0	0	↓	0	0	↓	0	↓	↓	↓	↓	↓
O-2a,O-5e	0	0	0	0	0	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
O-2b,O-5a	↑	↑	↑	↑	↑	→	↑	↑	→	↑	↓	0	0	↓	0
O-2b,O-5b	0	↑	↑	0	↑	↓	→	→	↓	→	↓	↓	↓	↓	↓
O-2b,O-5c	0	↑	↑	0	↑	↓	→	→	↓	→	↓	↓	↓	↓	↓
O-2b,O-5d	↑	↑	↑	↑	↑	→	↑	↑	→	↑	↓	0	0	↓	0
O-2b,O-5e	0	↑	↑	0	↑	↓	→	→	↓	→	↓	↓	↓	↓	↓
O-2c,O-5a	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	0	0	0	0	0
O-2c,O-5b	↑	↑	↑	↑	↑	0	↑	↑	0	↑	0	0	0	0	0
O-2c,O-5c	↑	↑	↑	↑	↑	0	↑	↑	0	↑	0	0	0	0	0
O-2c,O-5d	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	0	0	0	0	0
O-2c,O-5e	↑	↑	↑	↑	↑	0	↑	↑	0	↑	0	0	0	0	0

假设我们对比的两个 O-choice 组合分别是 {O-1b,O-2b,O-3b,O-4b,O-5a,O-6a,O-7a,O-8a} 和 {O-1b,O-2c,O-3a,O-4b,O-5a, O-6a,O-7a,O-8a}。当确定 Number of first-class meals 这个输出所发生的变化时, 我们找到两个 O-choice 组合中影响该输出的 choice 集合, 分别是 O-6a 和 O-6a。在 Number of first-class meals 对应的变化关系表中, 由 O-6a 变化到 O-6a 时, 输出的变化是 do not change, 这样我们就确定了 Number of first-class meals 这个输出发生的变化。当确定 Number of meals for pilots 这个输出发生的变化时, 首先找到两个 O-choice 组合中影响该输出的 choice 集合, 分别是 {O-2b, O-5a} 和 {O-2c,O-5a}, 从 Number of meals for pilots 对应的变化关系表中, 我们找到从 {O-2b, O-5a} 变化到 {O-2c,O-5a} 时, Number of meals for pilots 的变化是 decrease, 这样就确定了 Number of meals for pilots 发生的变化。将所有输出的变化都得到后, 合在一起就得到了输出的变化关系。

这种方法的好处是, 只需要测试人员去定义输出参数对应的变化关系表, 后面判断 O-choice 组合之间的变化关系时, 可以通过程序来实现, 并大大提升了 MR 识别的自动化程度。缺点也显而易见, 假如变化关系表中某个单元格的变化关系定义出错, 那么跟这个变化关系相关的 MR 都会出错。

对于 MOS 这个实例, 我们对所有通过这种方法得到的蜕变关系在原始程序上进行测试, 没有发现检出故障的蜕变关系。

### 6.4.3 测试用例生成

本研究中一条蜕变关系对应的原始测试用例与衍生测试用例使用构成该蜕变关系的两个 IO-CTF 生成。

METRIC\*通过将两个 IO-CTF 进行比较, 得到由一个 IO-CTF 变化到另一个 IO-CTF 时输入的变化关系与输出的变化关系, 再将输入变化关系与输出变化关系结合, 形成蜕变关系。也就是说, 由 METRIC\*识别得到的蜕变关系表达的是两个 IO-CTF 所表示的输入输出域之间的变化关系, 那么该蜕变关系的适用范围仅在这两个 IO-CTF 所表示的输入输出域上。从某种程度上来讲, IO-CTF 是对具有相似的程序执行行为的测试用例的抽象, 代表的是一组具有相似程序执行行为的测试用例。变化前的 IO-CTF 即代表着该蜕变关系的原始测试用例集, 变化后的 IO-CTF 即代表着该蜕变关系的衍生测试用例集。针对一条蜕变关系生成测试用例时, 需要在这条蜕变关系适用的输入域内选择实际的值构成测试用例, 即在该蜕变关系所对应的两个 IO-CTF 的输入域内选择实际的值生成测试用例。

对于一个 IO-CTF, 它的输入域由多个属于不同 category 的 choice 组成。生成一个 IO-CTF 的一个测试用例时, 需要在构成该 IO-CTF 的每一个 choice 所对

应的取值范围内取一个实际的值，然后将所有 choice 的取值组合在一起，形成该 IO-CTF 的一个测试用例。

在本研究中，分别使用了随机值法和边界值法在每个 choice 对应的取值范围内取实际值。边界值法仅用在了原始测试用例生成，原因是若边界值法在原始测试用例与衍生测试用例的生成中都使用的话，会出现组合爆炸问题，导致测试用例过多，执行测试的开销过大。

对于一条蜕变关系，生成其对应的测试用例需要分别生成构成该蜕变关系的两个 IO-CTF 的测试用例。由蜕变关系中变化前的 IO-CTF 生成的测试用例作为原始测试用例，由变化后的 IO-CTF 生成的测试用例作为衍生测试用例，将原始测试用例与衍生测试用例两者结合在一起，作为该蜕变关系的一个测试用例。

本研究将蜕变关系对应的测试用例写入 JUnit 测试脚本，这些测试脚本将被放入本研究开发的测试工具进行执行。

对于四个实验对象，使用随机值法和边界值法生成的测试用例数目如表 6-14 所示：

表 6-14 实验对象测试用例集规模

实验对象	随机值法			边界值法
	1 per MR	5 per MR	10 per MR	
BillCalculation	142	710	1420	1096
AirlinesBaggageBillingService	735	3675	7350	3007
ExpenseReimbursementSystem	1130	5650	11300	7772
MealOrderingSystem	3512	17560	35120	50907

值得一提的是，T.Y.曾对测试用例的生成方法提出建议。原始测试用例与衍生测试用例在同一 category 中不同 choice 上的取值应当有映射关系。举个例子，假设构成一个 candidate pair 的两个 IO-CTF 分别是 IO-CTF1 和 IO-CTF2。IO-CTF1 在 category1 中取 choice1 且 choice1 的取值范围是[10,20)，IO-CTF2 在 category1 中取 choice2 且 choice2 的取值范围是[20,30)。我们通过 IO-CTF1 生成原始测试用例，通过 IO-CTF2 生成衍生测试用例。假设 choice1 区间和 choice2 区间存线性映射关系，那么当原始测试用例在 choice1 范围内通过随机得到 14，衍生测试用例在 choice2 范围内取值时应当去 24。

这个建议从直觉上来讲感觉更严谨，但是实际使用的时候并不是特别实用。当输入变量是字符串的时候，区间与区间的映射规则就不太好找；另外就是无限大区间与有限大区间的映射，这之间的规则很难确定。基于以上原因，没有在测试用例生成的时候将区间映射规则加入进测试用例生成方法中。

6.4.4 测试执行

本研究开发了一个测试用例执行工具来辅助蜕变测试的执行。该工具运行在 windows 平台，由 mujava 中测试用例执行部分改写而来，能够实现对实验对象及其所有变异体自动化执行大批量测试用例，记录每个测试用例在未变异程序上的执行结果及能其够杀死的变异体，并将结果保存在 Excel 文档中。该工具的界面如图 6-1 所示：

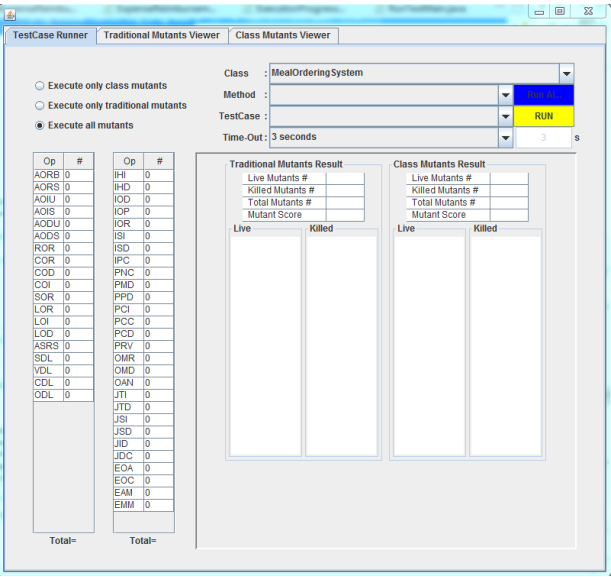


图 6-1 工具主界面

该工具使用前需要在 D 盘根目录建立如图 6-2 所示的目录。执行测试前需要将未变异的待测程序源代码放入 D:\mujava\src 中，将源码依赖的 jar 包放入 lib 中，将测试用例生成阶段生成的 JUnit 测试用例放入 rawtestcase 中，将待测程序的变异体放入 result 中。

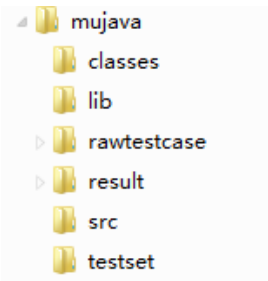


图 6-2 目录结构

打开工具，选择要测试的变异体、类及方法，点击蓝色按钮即可开始测试。



Progress 会提示测试用例执行进度，如图 6-3 所示

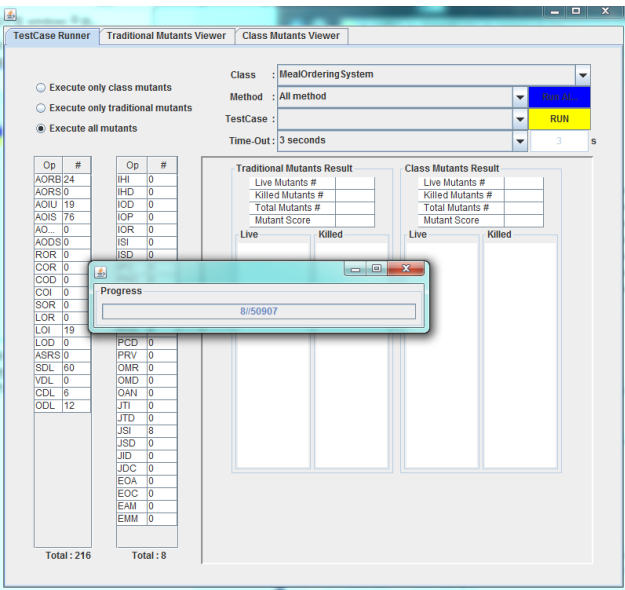


图 6-3 测试执行进度

该工具每执行 2000 个测试用例会记录一次结果，名称为 result\*.xlsx 的测试结果会保存在 D:\mujava 文件夹下。

### 6.4.5 数据处理

对于每一个实验对象，本研究使用随机值法及边界值法为蜕变关系集 MR 生成测试用例集，形成了四种大小不同的测试用例集。将使用随机值法为每个蜕变关系生成 1、5 和 10 个测试用例形成的测试用例集分别记为  $TS_{R1}$ 、 $TS_{R5}$  和  $TS_{R10}$ ，将使用边界值法为每个蜕变关系生成测试用例形成的测试用例集记为  $TS_B$ ，标识符汇总如表 6-15：

表 6-15 测试用例集标识

	随机值法			边界值法
	1 per MR	5 per MR	10 per MR	
测试用例集标识	$TS_{R1}$	$TS_{R5}$	$TS_{R10}$	$TS_B$

对于每一个测试用例集，依据其测试结果中每个测试用例能够杀死变异体的结果，计算整个测试用例集能够杀死的变异体，进而计算其变异得分。将  $TS_{R1}$ 、 $TS_{R5}$ 、 $TS_{R10}$  与  $TS_B$  的变异得分汇总。

通过比较  $TS_{R1}$ 、 $TS_{R5}$  与  $TS_{R10}$  的变异得分，观察测试用例集中测试用例的数

量与测试用例集变异得分之间的关系,分析测试用例数目的提升是否能够提升测试用例集的故障检测能力。将  $TS_{R1}$  与  $TS_B$  进行比较,观察两者故障检测能力的差异,分析边界值法衍生的测试用例能否提升测试用例集的故障检测能力。

以  $TS_{R1}$  为基准,将  $TS_{R5}$  和  $TS_{R10}$  与其进行比较,计算测试用例提升比率及故障检测提升比率,计算成本效率,分析哪种提升测试用例集的方法成本效率最高,得出提升测试用例集故障检测能力的好方法。

根据  $TS_{R1}$ 、 $TS_{R5}$ 、 $TS_{R10}$  和  $TS_B$ ,得到一个蜕变关系对应的所有测试用例,并根据这些测试用例杀死变异体的结果得到该蜕变关系杀死的所有变异体,进而计算该蜕变关系的变异得分。按上述方法计算所有蜕变关系的变异得分。计算蜕变关系的两个测试帧之间的 CP 距离得到,蜕变关系的内部差异性。对于每一个实验对象,将所有蜕变关系变异得分构成的序列与蜕变关系内部差异性构成的序列进行相关性分析,得出相关系数。

为回答问题 4,需要构造一组规模相同但覆盖 choice 数目不同的蜕变关系集,分析这一系列蜕变关系集的变异得分和其多样性的关系,得到蜕变关系集的故障检测能力和其多样性的关系。

于是问题回归到如何建立一组规模相同但覆盖 choice 数目不同的蜕变关系集。实际上,我们要解决的问题是如何构造规模为  $m$  且能够覆盖  $n$  个 choice 的蜕变关系集,然后再将  $n$  取不同的值,构造一系列能够覆盖不同数目 choice 的蜕变关系集。上述问题中依旧存在着诸多不确定性。比如构造规模为  $m$  的蜕变关系集中  $m$  是变化的,构造能够覆盖  $n$  个 choice 的蜕变关系集中  $n$  也是变化的。该问题中存在的两个变化量使这个问题很难解。我们将这个问题更特殊化一些,变成对于确定的  $a$  个 choice,如何构造规模为  $m$  的蜕变关系集,使这个蜕变关系集能够覆盖这确定的  $a$  个 choice。若这个问题可以解决的话,我们就可以通过改变  $a$  的数目来实现构造覆盖 choice 数目不同的蜕变关系集。对于上述更特殊化一些的问题,这是一个与集合覆盖问题十分相似的问题。我们可以通过穷举的方法找到所有能够覆盖这  $a$  个 choice 且规模为  $m$  的蜕变关系集。但是这样做可能会出现组合爆炸问题,原因是从蜕变关系全集中选择  $m$  个蜕变关系的选择方法可能极多,我们将这极多的选择方案一一去判断是否能够覆盖  $a$  个 choice 的话开销太大,不切实际。退而求其次,本研究采用了一个折中的办法来解决这一问题。首先求解能够覆盖  $a$  个 choice 且规模最小的蜕变关系集,然后再将这个规模最小的蜕变关系集扩充到  $m$  个大小。上述办法中求解能够覆盖  $a$  个 choice 且规模最小的蜕变关系集这个问题是标准的集合覆盖问题,我们通过贪心算法求其近似解,之后再得到的规模最小的蜕变关系集扩充,就可以得到覆盖  $a$  个 choice 且具有特定规模的蜕变关系集。改变  $a$  的大小,就可以实现构造特定规模且覆盖

特定数目 choice 的蜕变关系集。

在研究蜕变关系的集故障检测能力和其多样性的关系时,为了得到更一般化的结论,我们不能构造满足特定条件的一系列蜕变关系集并进行比较。对于不同的实验对象,我们首先需要确定的是我们从该实验对象的蜕变关系全集中选择出来的蜕变关系子集能够覆盖的 choice 数目有多少种情况,然后根据这些情况分别构造蜕变关系集进行比较,得出结论。对于一个有  $b$  个 category 和  $c$  个 choice 的实验对象,我们选择出来的蜕变关系子集能够覆盖的最少 choice 数目是  $b+1$ , 最多为  $c$ 。这样覆盖 choice 的数目就有  $c-(b+1) + 1$  即  $c-b$  种情况,需要为这  $c-b$  种情况构造 choice 全覆盖的蜕变关系集。这当中存在着一个问题,在构造能够覆盖  $d(d < c)$  数目 choice 的蜕变关系集时,我们如何选择要覆盖的这  $d$  个 choice? 还需要做的一个工作是找出从  $c$  个 choice 中选择  $d$  个 choice 的全部组合,这样才能考虑到全部情况。并且我们需要多次从这些组合中随机选择组合并构造蜕变关系集,得到多个能够覆盖  $d$  个 choice 的蜕变关系集。分析这些蜕变关系集的变异得分,可以得到在覆盖  $d$  个 choice 的情况下,构造的蜕变关系集变异得分的更一般化的分布结果。对比覆盖不同 choice 数目蜕变关系集变异得分的分布结果,分析蜕变关系集的变异得分和其多样性的关系,这样得出的结论更具有一般性。

对于一个有  $b$  个 category 和  $c$  个 choice 的实验对象,分析蜕变关系集故障检测能力和其多样性关系的步骤如下:

1. 确定从当前实验对象的蜕变关系全集中选择出来的子集能够覆盖的 choice 数目有多少种情况。能够覆盖 choice 的最小数目为  $b+1$ , 能够覆盖 choice 的最多数目为  $c$ , 情况数目为  $c-b$ 。执行 2 步骤;
2. 从  $c-b$  种情况中选择一种情况,假设选择的情况是覆盖  $d$  个 choice。找到从  $c$  个 choice 中选择  $d$  个 choice 的所有组合。执行 3 步骤;
3. 从 2 的所有组合中随机选择一种组合。用贪婪算法求其最小 choice 全覆盖蜕变关系集的近似解。若能得到近似解,则执行 4 步骤;若不能得到近似解,则重新执行 3 步骤;
4. 将 3 步骤的近似解扩充到需要的大小。若可以扩充到需要的大小,则执行 5 步骤;若不能扩充到需要的大小,则执行 3 步骤;
5. 计算 4 步骤中扩充后的蜕变关系集的变异得分。执行 3 步骤,直到得到了在覆盖  $d$  个 choice 的情况下所需要的蜕变关系集数目;
6. 计算在在覆盖  $d$  个 choice 的情况下,生成的所有蜕变关系集变异得分的 5 个指标,包括下四分位数、最小值、最大值、上四分位数及中位数;
7. 执行 2 步骤,直到所有情况的 5 个指标都被计算;

8. 根据这 5 个指标，画出覆盖不同 choice 数目情况下的盒图；
9. 观察盒图，分析蜕变关系集故障检测能力和其多样性关系。

## 6.5 实验结果及分析

实验结果分析将围绕研究问题开展讨论。

### 1) 满足测试帧覆盖的蜕变关系集的故障检测能力怎样？

对于四个实验对象，表 6-16 给出了不同测试用例集的的变异得分：

**表 6-16 测试用例集的的变异得分汇总**

实验对象	变异得分			
	随机值法			边界值法
	1 per MR	5 per MR	10 per MR	
BillCalculation	68.60%	72.67%	78.49%	81.40%
AirlinesBaggageBillingService	91.67%	91.67%	91.67%	91.67%
ExpenseReimbursementSystem	74.83%	76.16%	74.83%	86.09%
MealOrderingSystem	74.57%	74.57%	75.14%	74.57%

从表中我们可以得到：测试用例集的变异得分最低为 68.60%，最高为 91.67%，同一实验对象不同测试用例集的变异得分较为接近，不同实验对象测试用例集的变异得分差别较大。

观察包含不同数量测试用例的测试用例集的变异得分，分析测试用例数目的提升是否能提升蜕变关系集的故障检测能力。表 6-17 给出了四个实验对象不同测试用例集的测试用例数量与变异得分。

**表 6-17 测试用例集的测试用例数量与变异得分**

实验对象	测试用例集		测试用例数量	变异得分
BillCalculation	随机值法	1 per MR(BTS <sub>R1</sub> )	142	68.60%
		5 per MR(BTS <sub>R5</sub> )	710	72.67%
		10 per MR(BTS <sub>R10</sub> )	1420	78.49%
AirlinesBaggageBillingService	随机值法	1 per MR(ATS <sub>R1</sub> )	735	91.67%
		5 per MR(ATS <sub>R5</sub> )	3675	91.67%
		10 per MR(ATS <sub>R10</sub> )	7350	91.67%
ExpenseReimbursementSystem	随机值法	1 per MR(ETS <sub>R1</sub> )	1130	74.83%
		5 per MR(ETS <sub>R5</sub> )	5650	76.16%
		10 per MR(ETS <sub>R10</sub> )	11300	74.83%
MealOrderingSystem	随机值法	1 per MR(MTS <sub>R1</sub> )	3152	74.57%
		5 per MR(MTS <sub>R5</sub> )	17560	74.57%
		10 per MR(MTS <sub>R10</sub> )	31520	75.14%

从表中我们可以得到：对于 BillCalculation 这个实验对象，随着测试用例集规模的提升，测试用例集的变异得分也随之提升，说明提升测试用例集的规模能够提升测试用例集的变异得分；对于 AirlinesBaggageBillingService 这个实验对象，随着测试用例集规模的提升，测试用例集的变异得分并没有提升；对于 ExpenseReimbursementSystem 这个实验对象，测试用例集 ETS<sub>R5</sub> 比 ETS<sub>R1</sub> 的变异得分高，ETS<sub>R10</sub> 的规模是 ETS<sub>R1</sub> 的 10 倍，但变异得分相同；对于 MealOrderingSystem 这个实验对象，只有 MTS<sub>R5</sub> 的变异得分比 MTS<sub>R1</sub> 的变异得分略高，MTS<sub>R10</sub> 规模是 MTS<sub>R1</sub> 的 10 倍，但变异得分没有丝毫提升。

可以得出的结论是：提升测试用例集的规模能够提升测试用例集的故障检测能力，但是对故障检测能力提升的程度较微弱。

## 2) 测试用例生成方法否影响蜕变关系集的故障检测能力？不同测试用例生成方法的成本效率如何？

对于该研究问题，比较边界值分析法生成的测试用例集与随机值法生成的测试用例集的故障检测能力的差异。表 6-18 给出了四个实验对象的随机值法与边界值法生成的测试用例集数量与变异得分。

6-18 随机值法与边界值法生成的测试用例集数量与变异得分

实验对象	测试用例集		测试用例数量	变异得分
BillCalculation	随机值法	1 per MR(BTS <sub>R1</sub> )	142	68.60%
	边界值法		1096	81.40%
AirlinesBaggageBillingService	随机值法	1 per MR(ATS <sub>R1</sub> )	735	91.67%
	边界值法		3007	91.67%
ExpenseReimbursementSystem	随机值法	1 per MR(ETS <sub>R1</sub> )	1130	74.83%
	边界值法		7772	86.09%
MealOrderingSystem	随机值法	1 per MR(MTS <sub>R1</sub> )	3152	74.57%
	边界值法		50907	74.57%

从表中我们可以得到：对于 BillCalculation 和 MealOrderingSystem 这个实验对象，相比于随机值方法生成的测试用例，边界值分析方法衍生的测试用例能够提升测试用例集的变异得分；对于 AirlinesBaggageBillingService 和 MealOrderingSystem 这个实验对象，边界值分析方法衍生的测试用例不能够提升随机值方法生成的测试用例集的变异得分。

可以得出的结论是：边界值法衍生的测试用例能够提升随机值法生成的测试用例集的故障检测能力。但是对于 AirlinesBaggageBillingService 和 MealOrderingSystem 这两个实例，边界值法得到的测试用例没能提升变异得分，这个问题有待

进一步研究。

以 TSR1 为基础，计算 TSR5、TSR10 及 TSB 变异得分提升率与测试用例数目提升率之间的商，分析成本效率。计算公式如下所示：

$$cost\ effectiveness = \frac{\frac{MS(TS_*) - MS(TS_{R1})}{MS(TS_{R1})}}{\frac{Size(TS_*) - Size(TS_{R1})}{Size(TS_{R1})}}$$

注：TS\*代表计算成本效率使用的测试用例集。

由于 AirlinesBaggageBillingService 和 MealOrderingSystem 这两个实验对象边界值法生成的测试用例集相比于随机值法生成的测试用例集在变异得分上没有提升，故本部分不对这两个对象进行研究。成本效率如表 6-19 所示：

表 6-19 成本效率计算

实验对象	测试用例集		测试用例提升率	变异得分提升率	成本效率
BillCalculation	随机值法	1 per MR(BTS <sub>R1</sub> )	0.00%	0.00%	/
		5 per MR(BTS <sub>R5</sub> )	400.00%	5.93%	0.0148
		10 per MR(BTS <sub>R10</sub> )	900.00%	14.42%	0.0160
	边界值法(BTS <sub>B</sub> )		671.83%	18.66%	0.0278
Expense Reimbursement System	随机值法	1 per MR(ETS <sub>R1</sub> )	0.00%	0.00%	/
		5 per MR(ETS <sub>R5</sub> )	400.00%	1.78%	0.0045
		10 per MR(ETS <sub>R10</sub> )	900.00%	0.00%	0
	边界值法(ETS <sub>B</sub> )		587.79%	15.05%	0.0256

图 6-4 是随机值法和边界值法的成本效率对比图。从图中我们可以看出，边界值法的成本效率最高。

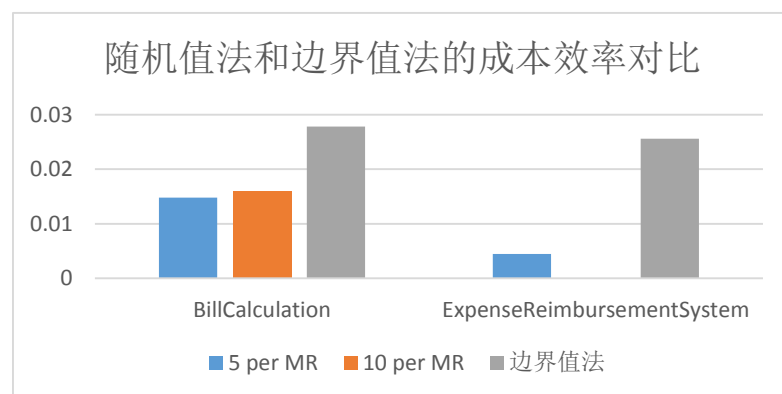


图 6-4 成本效率对比

3) 蜕变关系集的故障检测能力是否与蜕变关系集的多样性有关？

针对该问题，本研究对四个实验对象分别构造了具有特定规模且覆盖 choice 数目不同的蜕变关系集。为四个实验对象构造的不同种类蜕变关系集的数目如表 6-21 至表所示：

表 6-21 为 BillCalculation 构造的不同种类蜕变关系集的数目

蜕变关系 集数目		规模			
		10	20	30	40
覆盖 choice 数目	8	1000	1000	1000	1000
	9	1000	1000	1000	1000
	10	1000	1000	1000	1000
	11	1000	1000	1000	1000
	12	1000	1000	1000	1000

表 6-22 为 AirlinesBaggageBillingService 构造的不同种类蜕变关系集的数目

蜕变关系 集数目		规模			
		10	20	30	40
覆盖 choice 数目	8	1000	1000		
	9	1000	1000	1000	1000
	10	1000	1000	1000	1000
	11	1000	1000	1000	1000
	12	1000	1000	1000	1000

表 6-23 为 ExpenseReimbursementSystem 构造的不同种类蜕变关系集的数目

蜕变关系 集数目		规模			
		10	20	30	40
覆盖 choice 数目	7	1000	1000		
	8	1000	1000	1000	1000
	9	1000	1000	1000	1000
	10	1000	1000	1000	1000
	11	1000	1000	1000	1000
	12	1000	1000	1000	1000
	13	1000	1000	1000	1000
	14	1000	1000	1000	1000

表 6-24 为 MealOrderingSystem 构造的不同种类蜕变关系集的数目

蜕变关系集 数目		规模			
		10	20	30	40
覆盖 choice 数目	10	1000			
	11	1000	1000	1000	
	12	1000	1000	1000	1000
	13	1000	1000	1000	1000
	14	1000	1000	1000	1000
	15	1000	1000	1000	1000
	16	1000	1000	1000	1000
	17	1000	1000	1000	1000
	18	1000	1000	1000	1000
	19	1000	1000	1000	1000

对于覆盖 choice 数目不同的蜕变关系集，变异得分的分布如下图所示：

BillCalculation:

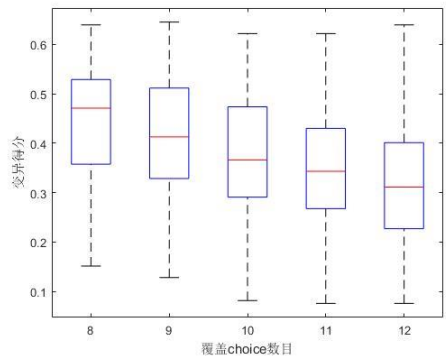


图 6-5 蜕变关系集变异得分（规模为 10）

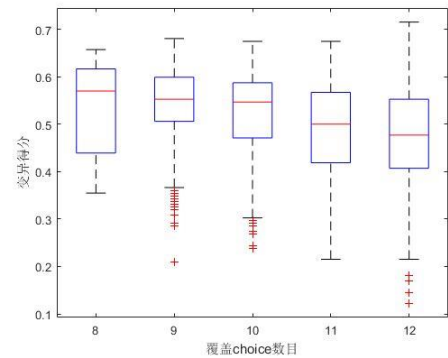


图 6-6 蜕变关系集变异得分（规模为 20）

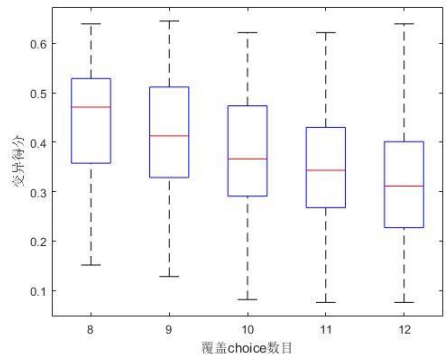


图 6-7 蜕变关系集变异得分（规模为 30）

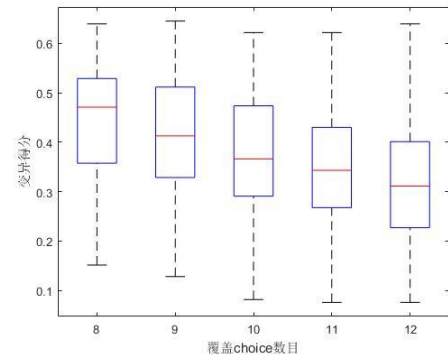


图 6-8 蜕变关系集变异得分（规模为 40）



AirlinesBaggageBillingService:

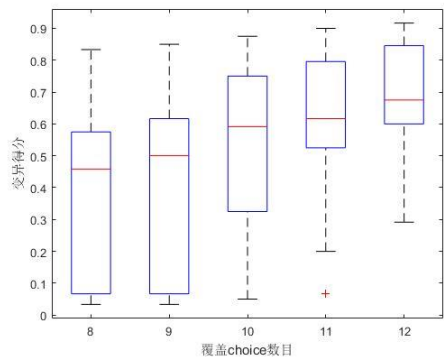


图 6-9 蜕变关系集变异得分（规模为 10）

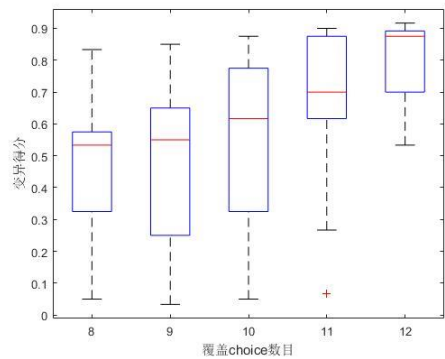


图 6-10 蜕变关系集变异得分（规模为 20）

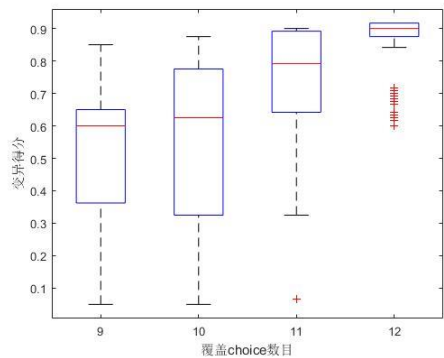


图 6-11 蜕变关系集变异得分（规模为 30）

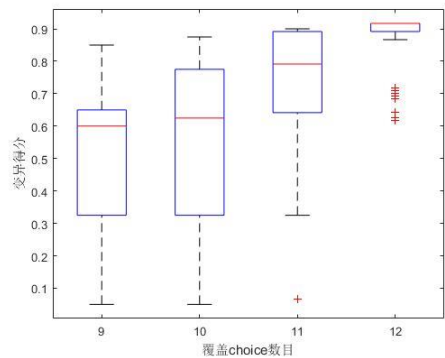


图 6-12 蜕变关系集变异得分（规模为 40）

ExpenseReimbursementSystem:

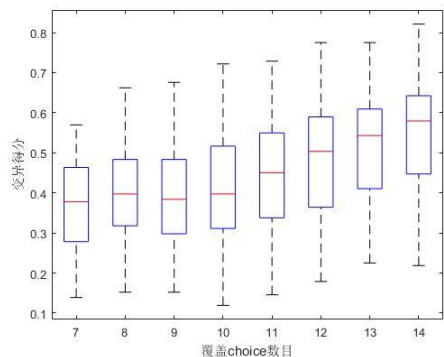


图 6-13 蜕变关系集变异得分（规模为 10）

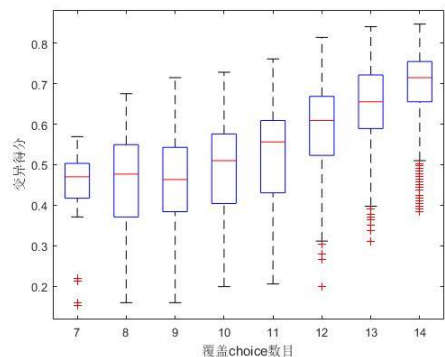


图 6-14 蜕变关系集变异得分（规模为 20）

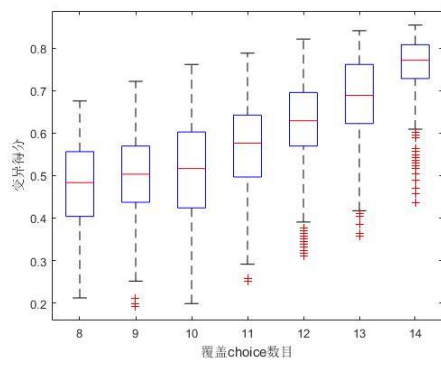


图 6-15 蜕变关系集变异得分（规模为 30）

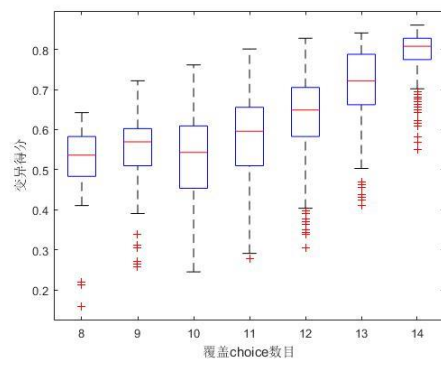


图 6-16 蜕变关系集变异得分（规模为 40）

### MealOrderingSystem:

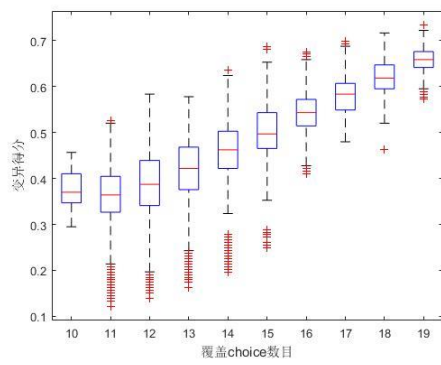


图 6-17 蜕变关系集变异得分（规模为 10）

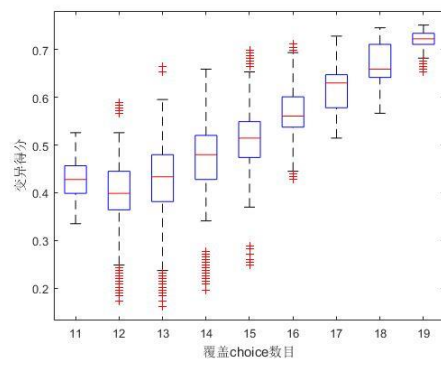


图 6-18 蜕变关系集变异得分（规模为 20）

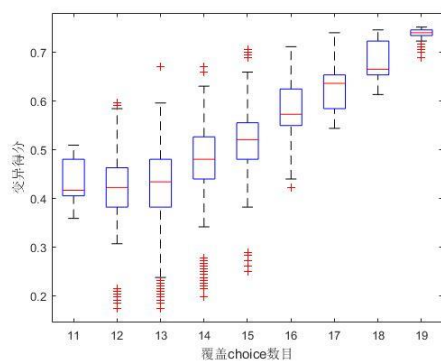


图 6-19 蜕变关系集变异得分（规模为 30）

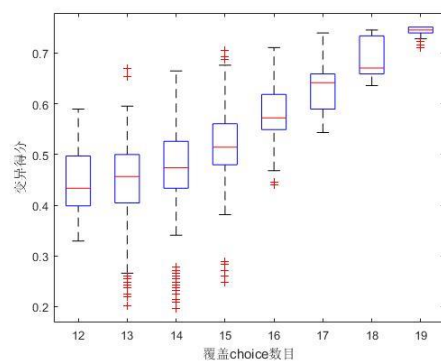


图 6-20 蜕变关系集变异得分（规模为 40）

由图 6-9 至图 6-12 可以得到：对于 AirlinesBaggageBillingService 这个实验对象，随着蜕变关系集覆盖 choice 数目的提升，蜕变关系集变异得分提升，且分布的区间逐渐缩小。这说明随着蜕变关系集覆盖 choice 数目的提升，蜕变关系集的故障检测能力提高，蜕变关系集的故障检测能力变得更加稳定，并且蜕变关系集规模的改变不影响上述观察结果。

由图 6-13 至图 6-16 可以得到：对于 ExpenseReimbursementSystem 这个实验对象，随着蜕变关系集覆盖 choice 数目的提升，蜕变关系集的变异得分也提升，但对于这个实验对象，变异得分分布的区间变化不明显。这说明随着蜕变关系集覆盖 choice 数目的提升，蜕变关系集的故障检测能力提高，且蜕变关系集规模的改变不影响上述观察结果。

由图 6-13 至图 6-16 可以得到：对于 MealOrderingSystem 这个实验对象，随着蜕变关系集覆盖 choice 数目的提升，蜕变关系集的变异得分有明显提升且变异得分的分布区间显著减小。这说明随着蜕变关系集覆盖 choice 数目的提升，蜕变关系集的故障检测能力提高，蜕变关系集的故障检测能力变得更稳定，并且蜕变关系集规模的改变不影响上述观察结果。

由图 6-5 至图 6-8 可以得到：对于 BillCalculation 这个实验对象，随着蜕变关系集覆盖 choice 数目的提升，蜕变关系集变异得分降低，变异得分分布的区间变大。这说明随着蜕变关系集覆盖 choice 数目的提升，蜕变关系集的故障检测能力下降，蜕变关系集的故障检测能力变得不稳定。为什么这个对象的实验结果和前三个的截然相反，本研究认为原因是这个实验对象的蜕变关系全集相比于其他三个实验对象来说过小，实验中选取的特定规模的蜕变关系集占 BillCalculation 蜕变关系全集过大，导致较多变异得分低的蜕变关系被选取，从而拉低了实验中选取的特定规模蜕变关系集的变异得分。

可以得出的结论是：蜕变关系集的多样性越高，其故障检测能力越强，且故障检测能力越稳定。

#### 6) 由 METRIC\*识别的蜕变关系难检出哪种类型的故障？

针对该研究问题，分别为四个实验对象统计所有未被杀死的变异体，观察这些变异体所具有的特征。未被杀死变异体数量及对应的变异算子统计结果如下表所示：

表 6-25 未被杀死变异体数量及对应的变异算子统计结果

实验对象	变异算子	未被杀死变异体数目	占总体比例
BillCalculation	AOIS	12	40.00%
	AORB	8	26.67%
	ODL	2	6.67%
	SDL	8	26.67%
	VDL	2	6.67%
AirlinesBaggageBillingService	AOIS	1	10.00%
	AORB	4	40.00%
	CDL	3	30.00%
	SDL	3	30.00%
ExpenseReimbursementSystem	AOIS	15	71.43%
	ROR	5	23.81%
	SDL	1	4.76%
MealOrderingSystem	AOIS	14	32.56%
	AORB	15	34.88%
	CDL	6	13.95%
	ODL	6	13.95%
	SDL	2	4.65%

从表格中不难发现，变异算子 AOIS 产生的变异体占有所有未被杀死变异体的比重最大。那么这究竟是因为什么呢？

本研究选取 MealOrderingSystem 未被杀死变异体中的 AOIS\_70 为例子，说明为什么 METRIC\*识别的蜕变关系比较难杀死 AOIS 产生的变异体。

AOIS\_70 的变异位置是 MealOrderingSystem 源代码中第 91 行，将

this.msr.numberOfChildMeals = this.numberOfChildPassengers \* 2 变异为

this.msr.numberOfChildMeals = --this.numberOfChildPassengers \* 2，即在这 this.numberOfChildPassengers 前加了“--”，让该变量先自减 1 再参与运算。NumberOfChildMeals 是 MealOrderingSystem 的一个输出，这个变异体的植入故障的位置恰好位于输出的前一个环节。将 this.numberOfChildPassengers 作为自变量，this.msr.numberOfChildMeals 作为因变量，研究错误植入前后自变量与因变

量之间关系的变化。若用 $x$ 代表自变量， $y$ 代表因变量，则植入故障前因变量与自变量间的关系是：

$$y = x * 2,$$

植入故障后因变量与自变量之间的关系是：

$$y = (x - 1) * 2,$$

将自变量与因变量之间的关系使用函数图像表示，如图 6-21 和 6-22 所示：

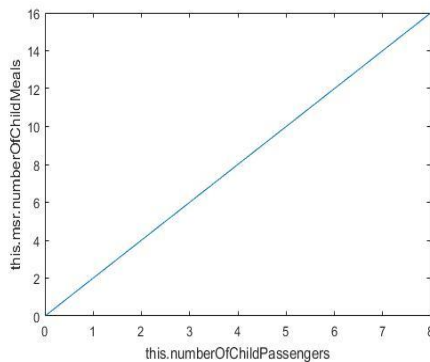


图 6-21 变异前的函数图像

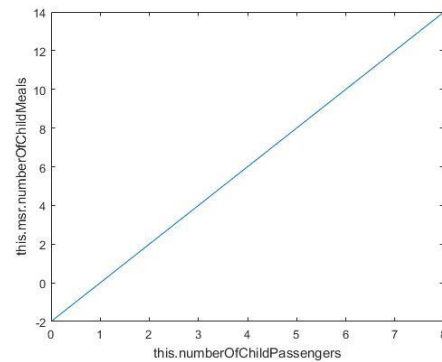


图 6-22 变异后的函数图像

通过两个图我们可以发现植入的故障仅仅将函数图像向下平移了两个单位距离，并没有改变函数的图像。蜕变测试通过比较多个输入对应的输出之间是否满足一定的蜕变关系来检测故障。具体到这个例子中，实际上就是比较函数图像上多个点之间是否满足一定的变化关系。例子中的故障仅仅是将这个函数进行了平移，并没有能力改变点与点之间的变化关系。或者说，该故障的植入并没有导致函数的趋势发生变化，从而比较多个点之间是否满足一定的变化关系就不能检测出该故障了。

在此，本研究的一个猜想是：由 METRIC\*识别的蜕变关系较难检出那些不能够改变程序输出变化趋势的变异算子所代表的故障。更一般的一个猜想是蜕变测试较难检出那些不能够改变程序输出变化趋势的变异算子所代表的故障。

## 6.6 总结

该部分对前文的研究问题进行回答，并总结实验中的不足之处。

### 1. 满足测试帧覆盖的蜕变关系集的故障检测能力怎样？

答：测试用例集的变异得分最低为 68.60%，最高为 91.67%。此外，研究发现提升测试用例集的规模能够提升测试用例集的故障检测能力，但是

对故障检测能力提升的程度较微弱。

**2. 测试用例生成方法是否影响蜕变关系集的故障检测能力？不同测试用例生成方法的成本效率如何？**

答：测试用例生成方法对蜕变关系集的故障检测能力有影响；边界值法衍生的测试用例能够提升蜕变关系集的故障检测能力，且边界值法的成本效率高于随机值法。

**3. 蜕变关系集的故障检测能力是否与蜕变关系集的多样性有关？**

答：蜕变关系集的多样性越高，其故障检测能力越强，且故障检测能力越稳定。

**4. 由 METRIC\*识别的蜕变关系难检出哪种类型的故障？**

答：METRIC\*识别的蜕变关系比较难检出由变异算子 AOIS 和 AORB 产生的变异体；由研究结果产生的一个猜想是：由 METRIC\*识别的蜕变关系较难检出那些不能够改变程序输出变化趋势的变异算子所代表的故障。

**不足之处：**

1. 在蜕变关系故障检测能力相关问题研究部分，对前三个研究问题进行的实验应当多次重复，这样才能尽可能避免偶然情况出现，使结果更加科学可靠。并且研究问题 6 没有进行深入研究。
2. 应当加入与他人工作对比的部分，例如与实验室王左翼师姐的基于数据变异的蜕变关系获取方法进行对比。
3. 实验对象的规模较小。

## 7 下一步工作

1. 对前三个研究问题进行的实验重复多次；
2. 与基于数据变异的蜕变关系获取方法进行对比；
3. 对 METRIC\*的相关支持工具进行实际实验；
4. 撰写论文。

## 8 参考文献

- [1] 单锦辉, 姜瑛, 孙萍. 软件测试研究进展[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2005, 41(1):134-145.
- [2] Meyer B. Seven Principles of Software Testing [J]. Computer, 2008, 41(8):99-101.
- [3] Weyuker E J. On Testing Non-Testable Programs [J]. Computer Journal, 1982, 25(4):465-470.
- [4] Chen T Y, Cheung S C, Yiu S M. Metamorphic testing: A new approach for generating next test cases[R]. Technical Report HKUST-CS98-01, Dept. of Computer Science, Hong Kong Univ. of Science and Technology, 1998.
- [5] 董国伟, 徐宝文, 陈林,等. 蜕变测试技术综述[J]. 计算机科学与探索, 2009, 3(2):130-143.
- [6] Murphy C, Raunak M S, King A, et al. On effective testing of health care simulation software [C]//Proceedings of the 3rd Workshop on Software Engineering in Health Care. ACM, 2011: 40-47.
- [7] Hui Z, Huang S, Ren Z, et al. Metamorphic Testing Integer Overflow Faults of Mission Critical Program: A Case Study [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 29(1):61-61.
- [8] Xie X, Ho J W K, Murphy C, et al. Testing and validating machine learning classifiers by metamorphic testing [J]. Journal of Systems and Software, 2011, 84(4): 544-558.
- [9] Groce A, Kulesza T, Zhang C, et al. You are the only possible oracle: Effective test selection for end users of interactive machine learning systems [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2014, 40(3): 307-323.
- [10] Chen T Y, Poon P L, Tse T H. A Choice Relation Framework for Supporting Category-Partition Test Case Generation [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2003, 29(7):577-593.
- [11] Chen T Y, Poon P L, Xie X. METRIC: METamorphic Relation Identification based on the Category-choice framework [J]. Journal of Systems & Software, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jss.201507037>.
- [12] Chen T Y, Kuo F C, Liu Y, et al. Metamorphic Testing and Testing with Special Values.[C]// Proceedings of Acis International Conference on Software



Engineering. 2004:128-134.

- [13] Chen T Y, Huang D H, Tse T H, et al. Case studies on the selection of useful relations in metamorphic testing[C]//Proceedings of the 4th Ibero-American Symposium on Software Engineering and Knowledge Engineering (JIISIC 2004). 2004: 569-583.
- [14] Mayer J, Guderlei R. An Empirical Study on the Selection of Good Metamorphic Relations[C]// Proceedings of IEEE 37th Annual Computer Software and Applications Conference. IEEE Computer Society, 2006:475-484.
- [15] Liu H, Kuo F C, Towey D, et al. How Effectively Does Metamorphic Testing Alleviate the Oracle Problem? [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2014, 40(1):4-22.
- [16] Chen T Y, Ho J W, Liu H, et al. An innovative approach for testing bioinformatics programs using metamorphic testing [J]. BMC Bioinformatics, 2009, 10(2):343-347.
- [17] Segura S, Hierons R M, Benavides D, et al. Automated metamorphic testing on the analyses of feature models [J]. Information and Software Technology, 2011, 53(3): 245-258.
- [18] Poon P L, Kuo F C, Liu H, et al. How can non-technical end users effectively test their spreadsheets? [J]. Information Technology & People, 2014, 27(4): 440-462.
- [19] Wu P, Shi X C, Tang J J, et al. Metamorphic Testing and Special Case Testing: A Case Study[J]. Journal of Software, 2005, 16(7):1210-1220.
- [20] Wu P. Iterative metamorphic testing [C]//Proceedings of the 29th Annual International Computer Software and Applications Conference (QSIC 2007). IEEE, 2005, 1: 19-24.
- [21] Dong G W, Xu B W, Chen L, et al. Case studies on testing with compositional metamorphic relations [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2008, 24(4): 437-443.
- [22] Zhang X, Xie X, Chen T Y. Test Case Prioritization Using Adaptive Random Sequence with Category-Partition-Based Distance[C]//Proceedings of the International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS 2016). IEEE, 2016: 374-385.