

### 2.7.2 谓词测试中的故障模型

本章论述的谓词测试，重点关注三类故障：布尔运算符故障、关系运算符故障、算术表达式故障。引起布尔运算符故障的原因在于：1) 使用了错误的布尔运算符；2) 漏用或误用非运算符；3) 圆括号使用错误；4) 布尔变量使用错误。当错误地使用关系运算符时将导致关系运算符故障。当算术表达式的结果值产生数量为  $\varepsilon$  的偏差时 (off-by- $\varepsilon$ ) 就会出现算术表达式故障。

给定谓词  $p$  和测试用例  $t$ ，用缩写  $p(t)$  表示谓词  $p$  针对  $t$  所取的真值。例如，若  $p$  为  $a < b \wedge r > s$  且  $t$  为  $\langle a=1, b=2, r=0, s=4 \rangle$ ，则  $p(t) = \text{false}$ 。下面举例说明上述的各种故障。

① 布尔运算符故障 设软件需求规范要求当  $(a < b) \vee (c > d) \wedge e$  为真时软件执行某动作。其中， $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为整型变量， $e$  为布尔变量。下面列出了该条件的 4 个错误编码，分别包含不同的布尔运算符故障：

- |                                      |                            |
|--------------------------------------|----------------------------|
| $(a < b) \wedge (c > d) \wedge e$    | 布尔运算符错误                    |
| $(a < b) \vee \neg (c > d) \wedge e$ | 非运算符错误                     |
| $(a < b) \wedge (c > d) \vee e$      | 布尔运算符错误                    |
| $(a < b) \vee (c > d) \wedge f$      | 布尔变量错误 (使用了 $f$ ，而不是 $e$ ) |

注意，一个谓词可能包含单个或多个故障，上面的第三个谓词就包含了两个故障。

② 关系运算符故障 关系运算符故障示例如下。

- |                                    |                             |
|------------------------------------|-----------------------------|
| $(a = b) \vee (c > d) \wedge e$    | 关系运算符错误 (使用了 $=$ ，而不是 $<$ ) |
| $(a = b) \vee (c \leq d) \wedge e$ | 关系运算符错误 (同时包含两个故障)          |
| $(a = b) \vee (c > d) \vee e$      | 关系运算符错误与布尔运算符错误             |

③ 算术表达式故障 考虑三种算术表达式的 off-by- $\varepsilon$  故障，分别为：off-by- $\varepsilon$ 、off-by- $\varepsilon^*$ 、off-by- $\varepsilon^+$ 。为了理解三者之间的差别，考虑正确关系表达式  $E_c$ ，其形式为  $e_1 \text{ rel}_1 e_2$ ；考虑错误的关系表达式  $E_i$ ，其形式为  $e_3 \text{ rel}_2 e_4$ ；假设算术表达式  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ 、 $e_4$  包含相同的变量集合。三种 off-by- $\varepsilon$  故障类型定义如下：

- $E_i$  包含 off-by- $\varepsilon$  故障，如果对于任何测试用例  $e_1 = e_2$ ，有  $|e_3 - e_4| = \varepsilon$ 。
- $E_i$  包含 off-by- $\varepsilon^*$  故障，如果对于任何测试用例  $e_1 = e_2$ ，有  $|e_3 - e_4| \geq \varepsilon$ 。
- $E_i$  包含 off-by- $\varepsilon^+$  故障，如果对于任何测试用例  $e_1 = e_2$ ，有  $|e_3 - e_4| > \varepsilon$ 。

假设正确的谓词  $E_c$  为  $a < b + c$ ，其中  $a$ 、 $b$  为整型变量。设  $\varepsilon = 1$ ，则  $E_i$  的三种错误故障

如下：

- |             |  |
|-------------|--|
| $a < b$     | 假设 $c = 1$ ， $E_i$ 包含 off-by-1 故障，因为对于任何测试用例 $a = b + c$ ，有 $ a - b  = 1$ 。              |
| $a < b + 1$ | 假设 $c \geq 2$ ， $E_i$ 包含 off-by-1* 故障，因为对于任何测试用例 $a = b + c$ ，有 $ a - (b + 1)  \geq 1$ 。 |
| $a < b - 1$ | 假设 $c > 0$ ， $E_i$ 包含 off-by-1+ 故障，因为对于任何测试用例 $a = b + c$ ，有 $ a - (b + 1)  > 1$ 。       |

给定正确的谓词  $p_c$ ，谓词测试的目标就是产生测试集  $T$ ，使得测试集  $T$  中至少存在一个测试用例  $t \in T$ ，满足：谓词  $p_c$ 、 $p_c$  的错误版本  $p_i$ ，针对测试用例  $t$  所得到的真值不同。据说，这种测试集可以确保能够发现上面介绍的所有类型的故障。

举例来说，假设  $p_c: a < b + c$ ； $p_i: a > b + c$ 。考虑测试集  $T = \{t_1, t_2\}$ ，其中

$$t_1: \langle a=0, b=0, c=0 \rangle$$

$$t_2: \langle a=0, b=1, c=1 \rangle$$