

怀疑度计算公式受偶然正确性影响理论分析

曹鹤玲^{1,3}, 姜淑娟², 靳小波¹, 杨卫东^{1,3}, 薛 猛²

(1. 河南工业大学信息科学与工程学院, 河南郑州 450001; 2. 中国矿业大学计算机科学与技术学院, 江苏徐州 221116; 3. 粮食信息处理与控制教育部重点实验室, 河南郑州 450001)

摘 要: 软件错误定位效率可能受诸多因素影响, 如测试用例优先级排序、测试用例构成、测试用例覆盖率及偶然正确性测试用例等. 主要关注偶然正确性对怀疑度计算公式错误定位效率的影响. 为此, 提出一个基于函数单调性的理论分析框架来证明 30 个经典怀疑度计算公式受偶然正确性影响的程度. 偶然正确性对怀疑度计算公式影响是有益的理论探索.

关键词: 软件调试; 错误定位; 偶然正确性; 理论证明

中图分类号: TP311 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)06-1365-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.06.013

Theoretical Analysis on Fault Localization Formulas by Coincidental Correctness

CAO He-ling^{1,3}, JIANG Shu-juan², JIN Xiao-bo¹, YANG Wei-dong^{1,3}, XUE Meng²

(1. College of Information Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

3. Key Laboratory of Grain Information Processing and Control, Ministry of Education, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: The efficiency of software fault localization may be affected by many factors, such as the prioritization of test case, the structure of test case, the coverage of test case and coincidental correctness test case etc. This paper focuses on the impact of the efficiency of calculation formula by coincidental correctness test cases. For this, we put forward a theoretical analysis framework based on function monotonicity to prove the validity of 30 classical calculation formulas by coincidental correctness. It is a useful theoretical exploration that the efficiency of calculation formula is affected by coincidental correctness.

Key words: software debugging; fault localization; coincidental correctness; theoretical analysis

1 引言

测试用例构成以及测试用例偶然正确性等因素可能对不同的错误定位方法影响程度不同. 主要关注偶然正确性对怀疑度计算公式错误定位效率的影响. 偶然正确性是指程序执行了缺陷语句但是仍然测试通过的现象^[1].

理论分析是相对于实证研究的另一种分析方式. 例如, Lee 等人^[2]从理论分析的角度证明 Tarantula 和

qe 公式的等价性, 进一步对多个怀疑度计算公式进行理论分析, 调查了 33 个怀疑度计算公式之间的等价关系, 并提出了 Naish1 和 Naish2 两个最优的怀疑度计算公式^[3]. 谢晓园等人^[4]提出了另一个理论分析框架, 分析了文献[3]中 30 个怀疑度计算公式的等价关系, 并且证明了两组最优怀疑度公式, 其中一组包含 2 个公式, 另一组包含 3 个公式, 并且无法证明这两组公式哪一组更优. 谢晓园等人^[5]理论分析了 Yoo 等人^[6]基于 GP (Genetic Programming) 机器推理的 30 个

收稿日期: 2016-11-21; 修回日期: 2017-07-05; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61602154, No. 61673384, No. 61502497, No. 61601170, No. 61772173, No. U1404617); 粮食信息处理与控制教育部重点实验室资助项目 (No. KFJJ-2016-105); 河南省高等学校重点科研项目 (No. 16A520005); 河南工业大学高层次人才基金 (No. 2015BS006); 河南工业大学“省属高校基本科研业务费专项资金” (No. 2016QNJH28); 河南省科技攻关计划项目 (No. 172102210216); 粮食行业公益性科研专项 (No. 201413001); 河南省高校科技创新团队 (No. 16IRTSTHN026)

怀疑度公式等价关系,发现 4 个基于 GP 的最优公式 GP2, GP3, GP13, GP19, 并且可以证明 GP13 和人工发现 (human-discovered) 的公式 Naish1、Naish2 等价. Masri 等人^[1]采用不等式证明了 Jaccard, Taratula, AM-PLP 和 Ochiai 这 4 个怀疑度计算公式去除偶然正确性后怀疑度值增大,从而说明去除偶然正确性对基于怀疑度计算公式的错误定位方法是一个安全缩减因素. 除上述 4 个怀疑度计算公式外,研究人员还提出了很多怀疑度计算公式,这些怀疑度计算公式受偶然正确性影响如何呢?

怀疑度计算公式可以表示成某些变量的函数,通过研究该函数的单调性从而研究该函数性质. 本文从理论分析的角度来证明偶然正确性对不同怀疑度计算公式的影响,为研究人员在软件错误定位时是否选择去除偶然正确性提供理论依据. 为此,提出一个基于函数单调性的理论分析框架来证明文献[4]中 30 个怀疑度计算公式受偶然正确性影响程度. 根据去除偶然正确性测试用例后是否能提高怀疑度计算公式值的大小从而将怀疑度计算公式分类.

2 相关定义

定义 1 偶然正确性元素 cc_e 给定一个程序元素 e , $f(T_f, e)$ 为失败测试用例 T_f 执行 e 的比率, $f(T_p, e)$ 为成功测试用例 T_p 执行程序元素 e 的比率^[1]. 程序元素 e 为偶然正确性元素 cc_e 则要求 e 出现在所有失败测试中,即 $f(T_f, e) = 1$, 而出现在成功测试中的概率为 $0 < f(T_p, e) < 1$. 具体定义如下:

$$cc_e = \{e | f(T_f, e) = 1 \wedge 0 < f(T_p, e) < 1\}$$

定义 2 偶然正确性测试用例 (T_{cc}) 一个测试用例 T 执行了偶然正确性元素 cc_e , 而没有导致程序执行结果失败, 则该测试用例为偶然正确性测试用例 T_{cc} ^[1].

定义 3 偶然正确性 (Coincidental Correctness, CC) 指的是程序执行了缺陷语句, 而缺陷语句的错误状态并没有传播到程序输出结果, 而使程序执行成功或没有抛出异常^[1].

3 理论分析框架

针对偶然正确性问题, 采用文献[1, 7]中处理方式, 从成功测试用例 T_p 中直接移除偶然正确性测试用例 T_{cc} . 对于一个怀疑度公式 $Sus(e)$ 来说, 一般认为去除偶然正确性测试用例后, 怀疑度公式将会得到一个更真实的值, 该值反映了错误定位方法的效率更高. 对于程序元素 e 用四元组表示为 $\langle n_{ep}, n_{ef}, n_{up}, n_{uf} \rangle$, 其中, n_{ep} 表示成功测试用例覆盖程序元素 e 的次数; n_{ef} 表示失败测试用例覆盖程序元素 e 的次数; n_{up} 表示成功测试用例未覆盖程序元素 e 的次数; n_{uf} 表示失败

测试用例未覆盖程序元素 e 的次数. 假设测试用例集中有 n 个偶然正确性测试用例 T_{cc} , 去除偶然正确性相当于从 n_{ep} 中减去 n . Masri 等人^[1]采用不等式证明的方式理论分析了 Tarantula, Jaccard, AMPLE 和 Ochiai 4 个怀疑度公式去除偶然正确性测试用例后, 错误定位效率有所提升, 但是并没有考虑其他怀疑度计算公式在去除偶然正确性后, 错误定位效率有何变化. 在文献[1]基础上对谢晓园等人^[4]理论证明的 30 个怀疑度公式分析其受偶然正确性的影响. 为此, 提出了一个基于函数单调性的理论分析框架, 把怀疑度公式 $Sus(e)$ 看成是四元组中变量 n_{ep} 的函数 $f(n_{ep})$, 对函数求一阶导数, 即

$$y' = f'(n_{ep}) = \left(\frac{u}{v}\right)' = \left(\frac{u'v - uv'}{v^2}\right).$$

其中, 对于公式 $Sus(e)$, 分子标记为 u , 分母标记为 v . 一阶导数是自变量的变化率, 用于判断函数的单调性; 二阶导数是一阶导数的变化率. 主要考虑函数单调性, 所以求函数的一阶导数. 当去除 n 个偶然正确性测试用例后, 怀疑度公式 $Sus(e)$ 标记为 $Sus^+(e)$, 一般认为 $Sus^+(e) \geq Sus(e)$ (符号“ $\geq$ ”表示优于), 即去除偶然正确性测试用例后, 怀疑度计算公式值增大; 或者 $Sus^+(e) < Sus(e)$ (符号“ $<$ ”表示劣于), 即去除偶然正确性测试用例后, 怀疑度计算公式值减小. 为表示方便, 用 x, y 分别表示变量 n_{ep} 和函数 $f(n_{ep})$, 求函数 $f(n_{ep})$ 偏导数来判断其单调性, 从而判断 $Sus^+(e) \geq Sus(e)$ 或者 $Sus^+(e) < Sus(e)$.

我们分 4 种情况讨论 $f'(n_{ep})$ 的取值情况如表 1 所示.

表 1 怀疑度函数单调性关系

函数	变量	导数	单调性	函数关系	类型
$f(n_{ep})$	n_{ep}	小于 0	单调减少	$f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$	T_1
	常数	—	—	$f(n_{ep} - n) = f(n_{ep})$	T_2
	n_{ep}	大于或 小于 0	单调增加 或减少	$f(n_{ep} - n) < f(n_{ep})$ or $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$	T_3
	n_{ep}	大于 0	单调增加	$f(n_{ep} - n) < f(n_{ep})$	T_4

(1) “ T_1 -提升型”. 当 $f'(n_{ep}) < 0$ 时, 表示函数 $f(n_{ep})$ 单调减少, 从而判别出 $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$, 即 $Sus^+(e) \geq Sus(e)$; 说明去除偶然正确性测试用例后怀疑度公式 $Sus(e)$ 怀疑度值增加, 作用于错误语句时, 错误定位效率提升.

(2) “ T_2 -不变型”. 当 $f'(n_{ep}) = 0$ 时, 从而判别出 $f(n_{ep} - n) = f(n_{ep})$, $Sus^+(e) = Sus(e)$; 说明去除偶然正确性测试用例后怀疑度公式 $Sus(e)$ 怀疑度值没有变化, 错误定位效率不变.

(3) “ T_3 -不确定型”. 当 $f'(n_{ep})$ 的取值为正数或负数不确定, 或 $f'(n_{ep})$ 的取值需要分区间进行讨论时, 从

而 $f(n_{ep} - n)$ 与 $f'(n_{ep})$ 的大小关系也不确定,即 $\text{Sus}^+(e)$ 与 $\text{Sus}(e)$ 的大小关系不确定,说明去除偶然正确性测试用例后怀疑度公式 $\text{Sus}(e)$ 怀疑度值增大或减少不确定;

(4)“ T_4 -降低型”. 当 $f'(n_{ep}) > 0$ 时,表示函数 $f(n_{ep})$ 单调增加,从而判别出 $f(n_{ep} - n) < f(n_{ep})$,即 $\text{Sus}^+(e) < \text{Sus}(e)$,说明去除偶然正确性测试用例后怀疑度公式 $\text{Sus}(e)$ 怀疑度值减少,作用于错误语句时,错误定位效率下降.

以上 4 种情况需要说明的是:作用于正确语句时,错误定位效率显然无变化.

表 2,表 3 和表 4 中公式分别为去除偶然正确性后怀疑度计算公式 $\text{Sus}(e)$ 值增大、不变和不确定的 3 类公式. 字母 $A \sim R$ 类是根据 n_{ep} 的外在形式给出的类别,以每类公式中的第 1 个公式为代表从而证明之.

4 实例研究

4.1 “ T_1 -提升型”怀疑度计算公式

为表述方便,将公式 $\text{Sus}(e)$ 去除偶然正确性后公式标记 $\text{Sus}^+(e)$. 例如,对于 Jaccard 公式,去除偶然正确性后的公式标记为 Jaccard^+ . 目标是判定怀疑度公式的导数是否大于 0,怀疑度公式计算时有时没有必要完全展开. 这是因为 u, v 是以 $n_{ep}, n_{ef}, n_{up}, n_{uf}$ 为自变量的函数. 即: $u = f(n_{ep}, n_{ef}, n_{up}, n_{uf})$; $v = f(n_{ep}, n_{ef}, n_{up}, n_{uf})$; 这样, u, v 求一阶导数后可直接判断正负号,没有必要展开.

命题 1 $\text{Jaccard}^+ \geq \text{Jaccard}$ (A1)

证明 设 $u = n_{ef}, v = n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}$.

$$f'(n_{ep}) = \left(\frac{n_{ef}}{n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}} \right)' = \frac{1}{v^2} (-n_{ef})$$

因为 $n_{ef} > 0$, 所以分子 $(-n_{ef}) < 0$; 并且 $v = n_{ef} + n_{uf} + n_{ep} > 0$, 分母 $v^2 > 0$, 所以 $f'(n_{ep}) < 0$. 由导数的性质可知, $f(n_{ep})$ 为单调递减函数, 所以 $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$, 即 $\text{Jaccard}^+ \geq \text{Jaccard}$.

命题 2 $\text{Goodman}^+ \geq \text{Goodman}$ (B13)

证明 设 $u = 2n_{ef} - n_{uf} - n_{ep}, v = 2n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}$.

$$\begin{aligned} f'(n_{ep}) &= \left(\frac{2n_{ef} - n_{uf} - n_{ep}}{2n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}} \right)' = \frac{1}{v^2} (-v - u) \\ &= \frac{1}{v^2} (-4n_{ef}) \end{aligned}$$

$n_{ef} > 0$, 分子 $(-4n_{ef}) < 0$; 并且 $v = 2n_{ef} + n_{uf} + n_{ep} > 0$, 分母 $v^2 > 0$; 所以 $f'(n_{ep}) < 0$. 由导数性质可知, $f(n_{ep})$ 为单调递减函数, 所以 $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$, 即 $\text{Goodman}^+ \geq \text{Goodman}$.

命题 3 $\text{Naish2}^+ \geq \text{Naish2}$ (C15)

证明 首先将 $f(n_{ep}) = n_{ef} - \frac{n_{ep}}{n_{ep} + n_{up} + 1}$ 变形为:

$$f(n_{ep}) = \frac{n_{ef}(n_{ep} + n_{up} + 1) - n_{ep}}{n_{ep} + n_{up} + 1}.$$

设 $u = n_{ef}(n_{ep} + n_{up} + 1) - n_{ep}, v = n_{ep} + n_{up} + 1$.

$$f'(n_{ep}) = \left(n_{ef} - \frac{n_{ep}}{n_{ep} + n_{up} + 1} \right)' = \frac{1}{v^2} (-2n_{ep} - n_{up} - 1).$$

$n_{ep} \geq 0, n_{up} \geq 0$, 所以分子 $(-2n_{ep} - n_{up} - 1) < 0$; 并且分母 $v^2 > 0$, 所以 $f'(n_{ep}) < 0$. 由导数性质可知, $f(n_{ep})$ 为单调递减函数, 所以 $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$, 即 $\text{Naish2}^+ \geq \text{Naish2}$.

命题 4 $\text{Wong3}^+ \geq \text{Wong3}$ (D17)

$$\text{证明 } f'(n_{ep}) = \begin{cases} -1, & \text{if } n_{ep} \leq 2 \\ -0.1, & \text{if } 2 < n_{ep} \leq 10 \\ -0.001, & \text{if } n_{ep} > 10 \end{cases}$$

由求导结果可知, 无论 n_{ep} 取何值, $f'(n_{ep})$ 总小于 0. 由导数性质可知, $f(n_{ep})$ 为单调递减函数, 所以 $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$, 即 $\text{Wong3}^+ \geq \text{Wong3}$.

命题 5 $\text{Fleiss}^+ \geq \text{Fleiss}$ (E19)

证明 设

$$\begin{aligned} u &= 4n_{ef}n_{up} - 4n_{uf}n_{ep} - (n_{uf} - n_{ep})^2, \\ v &= (2n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}) + (2n_{up} + n_{uf} + n_{ep}). \\ f'(n_{ep}) &= \left[\frac{4n_{ef}n_{up} - 4n_{uf}n_{ep} - (n_{uf} - n_{ep})^2}{(2n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}) + (2n_{up} + n_{uf} + n_{ep})} \right]' \\ &= \frac{1}{v^2} [(-2n_{uf} - 2n_{ep})v - 2u] \\ &= \frac{1}{v^2} [-2(n_{uf} + n_{ep})^2 - 4(n_{uf} + n_{ep})(n_{ef} + n_{up}) \\ &\quad - 8n_{ef}n_{up}] \end{aligned}$$

因为 $n_{ef} > 0, n_{uf} \geq 0, n_{ep} \geq 0, n_{up} \geq 0$, 从而 $-2(n_{uf} + n_{ep})^2 \leq 0; -4(n_{uf} + n_{ep})(n_{ef} + n_{up}) < 0, -8n_{ef}n_{up} < 0$, 所以 $[-2(n_{uf} + n_{ep})^2 - 4(n_{uf} + n_{ep})(n_{ef} + n_{up}) - 8n_{ef}n_{up}] < 0$, 又分母 $v^2 > 0$, 所以 $f'(n_{ep}) < 0$. 由导数性质可知, $f(n_{ep})$ 为单调递减函数, 所以 $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$, 即 $\text{Fleiss}^+ \geq \text{Fleiss}$.

命题 6 $\text{Tarantula}^+ \geq \text{Tarantula}$ (F21)

证明 Tarantula 公式通分后变为:

$$f(n_{ep}) = \frac{n_{ef}n_{ep} + n_{ef}n_{up}}{n_{ep}(2n_{ef} + n_{uf}) + n_{ef}n_{up}}$$

设 $u = n_{ef}n_{ep} + n_{ef}n_{up}, v = n_{ep}(2n_{ef} + n_{uf}) + n_{ef}n_{up}$.

$$\begin{aligned} f'(n_{ep}) &= \left[\frac{n_{ef}n_{ep} + n_{ef}n_{up}}{n_{ep}(2n_{ef} + n_{uf}) + n_{ef}n_{up}} \right]' \\ &= \frac{1}{v^2} [n_{ef}v - (n_{ef}n_{ep} + n_{ef}n_{up})(2n_{ef} + n_{uf})] \\ &= \frac{1}{v^2} (-n_{ef}^2n_{up} - n_{ef}n_{up}n_{uf}) \end{aligned}$$

因为 $n_{ef} > 0, n_{up} \geq 0, n_{uf} \geq 0$, 所以分子 $(-n_{ef}^2 n_{up} - n_{ef} n_{up} n_{uf}) < 0$; 并且分母 $v^2 > 0$, 所以 $f'(n_{ep}) < 0$. 由导数性质可知, $f(n_{ep})$ 为单调递减函数, 所以 $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$, 即 $\text{Tarantula}^+ \geq \text{Tarantula}$.

命题 7 $\text{Ochiai}^+ \geq \text{Ochiai}$ (G22)

$$\begin{aligned} \text{证明 } f'(n_{ep}) &= \left(\frac{n_{ef}}{\sqrt{(n_{ef} + n_{uf})(n_{ef} + n_{ep})}} \right)' \\ &= \frac{-n_{ef} v^{-1/2}}{2v^2} = \frac{-n_{ef}}{2v^{5/2}} \end{aligned}$$

因为 $n_{ef} > 0$, 所以分子 $(-n_{ef}) < 0$; 并且 $v = \sqrt{(n_{ef} + n_{uf})(n_{ef} + n_{ep})} > 0$, 分母 $2v^{5/2} > 0$, 所以 $f'(n_{ep}) < 0$. 由导数性质可知, $f(n_{ep})$ 为单调递减函数, 所以 $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$, 即 $\text{Ochiai}^+ \geq \text{Ochiai}$.

命题 8 $\text{Arithmetic Mean}^+ \geq \text{Arithmetic Mean}$ (O23)

证明

$$\begin{aligned} f'(n_{ep}) &= \left[\frac{2n_{ef}n_{up} - 2n_{uf}n_{ep}}{(n_{ef} + n_{ep})(n_{up} + n_{uf}) + (n_{ef} + n_{uf})(n_{ep} + n_{up})} \right]' \\ &= \frac{1}{v^2} [-2n_{uf}v - (2n_{ef}n_{up} - 2n_{uf}n_{ep}) \\ &\quad \cdot (n_{up} + 2n_{uf} + n_{ef})] \\ &= \frac{1}{v^2} [-2n_{uf}(4n_{ef}n_{up} + n_{ef}n_{uf} + n_{uf}n_{up}) \\ &\quad - 2n_{ef}n_{up}^2 - 2n_{ef}^2n_{up}] \end{aligned}$$

因为 $n_{ef} > 0, n_{up} \geq 0, n_{uf} \geq 0$, 所以分子小于 0; 并且 $v^2 > 0$, 所以 $f'(n_{ep}) < 0$. 由导数性质可知, $f(n_{ep})$ 为单调递减函数, 所以 $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$, 即 $\text{Arithmetic Mean}^+ \geq \text{Arithmetic Mean}$.

由以上理论分析可知, 表 2 中 23 个怀疑度计算公式, 虽然形式上有差异, 但经过证明 $f'(n_{ep}) < 0$, 为“ T_1 -提升型”怀疑度计算公式, $f(n_{ep})$ 为单调递减函数, 所以去除偶然正确性后, 怀疑度计算公式值增加.

4.2 “ T_2 -不变型”怀疑度计算公式

命题 9 $\text{Naish1}^+ = \text{Naish1}$ (P24)

证明 因为 $T_P = n_{ep} + n_{up}$, 所以 Naish1 可变形如下:

$$f(n_{ep}) = \begin{cases} -1, & \text{if } n_{ef} < T_F \\ n_{up}, & \text{if } n_{ef} = T_F \end{cases}$$

从变形后的公式可以看出 Naish1 与变量 n_{ep} 无关, 因此 $\text{Naish1}^+ = \text{Naish1}$. 通过观察表 3 中的公式 P24 ~ P28, 发现这些公式都和变量 n_{ep} 无关, 去除偶然正确性没有影响到这些公式, 因此, 表 3 中公式为去除偶然正确性后怀疑度值无变化的公式, 为“ T_2 -不变型”怀疑度计算公式.

表 2 移除偶然正确性怀疑度值增加公式 (T_1 -提升型)

公式名称	公式描述	序号
Jaccard	$\frac{n_{ef}}{n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}}$	A1
Anderberg	$\frac{n_{ef}}{n_{ef} + 2(n_{uf} + n_{ep})}$	A2
S ϕ rensen-Dice	$\frac{2n_{ef}}{2n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}}$	A3
Dice	$\frac{2n_{ef}}{n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}}$	A4
qe	$\frac{n_{ef}}{n_{ef} + n_{ep}}$	A5
Simple Matching	$\frac{n_{ef} + n_{up}}{n_{ef} + n_{uf} + n_{ep} + n_{up}}$	A6
Sokal	$\frac{2(n_{ef} + n_{up})}{2(n_{ef} + n_{up}) + n_{uf} + n_{ep}}$	A7
Rogers & Tanimoto	$\frac{n_{ef} + n_{up}}{n_{ef} + n_{up} + 2(n_{uf} + n_{ep})}$	A8
Russel & Rao	$\frac{n_{ef}}{n_{ef} + n_{uf} + n_{ep} + n_{up}}$	A9
M2	$\frac{n_{ef}}{n_{ef} + n_{up} + 2(n_{uf} + n_{ep})}$	A10
Kulczynski2	$\frac{1}{2} \left(\frac{n_{ef}}{n_{ef} + n_{uf}} + \frac{n_{ef}}{n_{ef} + n_{ep}} \right)$	A11
Rogot1	$\frac{1}{2} \left(\frac{n_{ef}}{2n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}} + \frac{n_{up}}{2n_{up} + n_{uf} + n_{ep}} \right)$	A12
Goodman	$\frac{2n_{ef} - n_{uf} - n_{ep}}{2n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}}$	B13
Hamann	$\frac{n_{ef} + n_{up} - n_{uf} - n_{ep}}{n_{ef} + n_{uf} + n_{ep} + n_{up}}$	B14
Naish2	$\frac{n_{ep}}{n_{ep} - n_{up} + 1}$	C15
AMPLE2	$\frac{n_{ef}}{n_{ef} + n_{uf}} - \frac{n_{ep}}{n_{ep} + n_{up}}$	C16
Wong3	$n_{ef} - h$, where $h = \begin{cases} n_{ep}, & \text{if } n_{ep} \leq 2 \\ 2 + 0.1(n_{ep} - 2), & \text{if } 2 < n_{ep} \leq 10 \\ 2.8 + 0.001(n_{ep} - 10), & \text{if } n_{ep} > 10 \end{cases}$	D17
Wong2	$n_{ef} - n_{ep}$	D18
Fleiss	$\frac{4n_{ef}n_{up} - 4n_{uf}n_{ep} - (n_{uf} - n_{ep})^2}{(2n_{ef} + n_{uf} + n_{ep}) + (2n_{up} + n_{uf} + n_{ep})}$	E19
Scott	$\frac{4n_{ef}n_{up} - 4n_{uf}n_{ep} - (n_{uf} - n_{ep})^2}{(2n_{ef} + n_{uf} + n_{ep})(2n_{up} + n_{uf} + n_{ep})}$	E20
Tarantula	$\frac{n_{ef}}{n_{ef} + n_{uf}} \bigg/ \left(\frac{n_{ef}}{n_{ef} + n_{uf}} + \frac{n_{ep}}{n_{ep} + n_{up}} \right)$	F21
Ochiai	$\frac{n_{ef}}{\sqrt{(n_{ef} + n_{uf})(n_{ef} + n_{ep})}}$	G22
Arithmetic Mean	$\frac{2n_{ef}n_{up} - 2n_{uf}n_{ep}}{(n_{ef} + n_{ep})(n_{up} + n_{uf}) + (n_{ef} + n_{uf})(n_{ep} + n_{up})}$	O23

表 3 移除偶然正确性怀疑度不变的公式(T_2 -不变型)

公式名称	公式描述	序号
Naish1	$\begin{cases} -1, & \text{if } n_{ef} < T_F \\ T_P - n_{ep}, & \text{if } n_{ef} = T_F \end{cases}$	P24
Binary	$\begin{cases} 0, & \text{if } n_{ef} < T_F \\ 1, & \text{if } n_{ef} = T_F \end{cases}$	P25
Euclid	$\sqrt{n_{ef} + n_{up}}$	P26
Wong1	n_{ef}	P27
Hamming etc.	$n_{ef} + n_{up}$	P28

4.3 “ T_3 -不确定型”怀疑度计算公式

命题 10 $\text{CBI Inc.}^+ \geq \text{CBI Inc.}$ 或者
 $\text{CBI Inc.}^+ < \text{CBI Inc.}$ (Q29)

证明

$$f'(n_{ep}) = \frac{-n_{ef}}{(n_{ef} + n_{ep})^2} + \frac{n_{ef} + n_{uf}}{(n_{ef} + n_{uf} + n_{ep} + n_{up})^2}$$

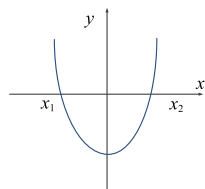
$$= \frac{1}{(n_{ef} + n_{ep})^2 (n_{ef} + n_{uf} + n_{ep} + n_{up})^2} g(n_{ep})$$

标记

$$g(n_{ep}) = n_{uf}n_{ep}^2 - 2n_{ef}n_{up}n_{ep} - (n_{uf}n_{ef}^2 + 2n_{up}n_{ef}^2 + n_{ef}n_{uf}^2 + 2n_{ef}n_{uf}n_{up} + n_{ef}n_{up}^2)$$

分母大于零,所以 $f'(n_{ep})$ 符号由分子中函数 $g(n_{ep})$ 的符号决定.假定 $g(n_{ep}) = 0$,其中 $a = n_{uf}$, $b = -2n_{ef}n_{up}$, $c = -(n_{uf}n_{ef}^2 + 2n_{up}n_{ef}^2 + n_{ef}n_{uf}^2 + 2n_{ef}n_{uf}n_{up} + n_{ef}n_{up}^2)$,得到一个一元二次方程 $g(n_{ep}) = an_{ep}^2 + bn_{ep} + c$,采用 $\Delta = b^2 - 4ac$ 来判定方程的两个根,因为 $\Delta > 0$,所以方程有两个根,又因为 $c < 0$,所以方程有一个正根一个负根.

假设有两个根 x_1 和 x_2 ($x_1 < 0 < x_2$)如图1所示.因为变量 n_{ep} 的取值范围为 $[0, +\infty)$,所以函数 $g(n_{ep})$ 取如图1所示在 y 轴右侧的部分.

图1 函数 $g(n_{ep})$ 抛物线

(1)当变量 n_{ep} 取值范围为 $[0, x_2]$ 时, $g(n_{ep}) \leq 0$,即 $f(n_{ep})$ 的一阶导数 $f'(n_{ep}) \leq 0$,即为单调递减函数, $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$,即 $\text{CBI Inc.}^+ \geq \text{CBI Inc.}$;

(2)当变量 n_{ep} 取值范围为 $(x_2, +\infty)$ 时, $g(n_{ep}) > 0$,即 $f(n_{ep})$ 的一阶导数 $f'(n_{ep}) > 0$,即为单调递增函数, $f(n_{ep} - n) < f(n_{ep})$,即 $\text{CBI Inc.}^+ < \text{CBI Inc.}$

命题 11 $\text{Cohen}^+ \geq \text{Cohen}$ 或者

$\text{Cohen}^+ < \text{Cohen}$ (R30)

证明 分母

$$v = (n_{ef} + n_{ep})(n_{up} + n_{ep}) + (n_{ef} + n_{uf})(n_{uf} + n_{up}),$$

$$v' = 2n_{ep} + (n_{ef} + n_{up}),$$

$$f'(n_{ep}) = \frac{1}{v^2}(-2n_{uf}v - uv') = \frac{1}{v^2}g(n_{ep}).$$

标记

$$g(n_{ep}) = 2n_{uf}n_{ep}^2 - 4n_{ef}n_{up}n_{ep} - 2n_{up}n_{ef}^2 - 2n_{ef}n_{uf}^2 - 2n_{ef}n_{uf}n_{up} - 2n_{uf}(n_{ef} + n_{uf})(n_{uf} + n_{up}).$$

分母 $v^2 > 0$,所以 $f'(n_{ep})$ 的符号由函数 $g(n_{ep})$ 的符号决定.假定 $g(n_{ep}) = 0$,得到一个一元二次方程 $g(n_{ep}) = an_{ep}^2 + bn_{ep} + c$,采用 $\Delta = b^2 - 4ac$ 来判定方程的两个根,因为 $\Delta > 0$ 且方程有两个根,又因为 $c < 0$,所以方程有一个正根一个负根为 x_1 和 x_2 ($x_1 < 0 < x_2$).因为变量 n_{ep} 的取值范围为 $[0, +\infty)$,所以函数 $g(n_{ep})$ 取如图1所示在 y 轴右侧的部分.

(1)当 $0 \leq n_{ep} \leq x_2$ 时, $g(n_{ep}) \leq 0$,即 $f(n_{ep})$ 的一阶导数 $f'(n_{ep}) \leq 0$,即为单调递减函数, $f(n_{ep} - n) > f(n_{ep})$,即 $\text{Cohen}^+ \geq \text{Cohen}$;

(2)当 $n_{ep} > x_2$ 时, $g(n_{ep}) > 0$,即 $f(n_{ep})$ 的一阶导数 $f'(n_{ep}) > 0$,即为单调递增函数, $f(n_{ep} - n) < f(n_{ep})$,即 $\text{Cohen}^+ < \text{Cohen}$.

表 4 移除偶然正确性怀疑度变化不确定公式(T_3 -不确定型)

公式名称	公式描述	序号
CBI Inc.	$\frac{n_{ef}}{n_{ef} + n_{ep}} - \frac{n_{ep} + n_{uf}}{n_{ef} + n_{uf} + n_{ep} + n_{up}}$	Q29
Cohen	$\frac{2n_{ef}n_{up} - 2n_{uf}n_{ep}}{(n_{ef} + n_{ep})(n_{up} + n_{ep}) + (n_{ef} + n_{uf})(n_{uf} + n_{up})}$	R30

总之,表4中CBI Inc.和Cohen怀疑度计算公式的值是否提升依赖于 n_{ep} 的范围,若 $0 \leq n_{ep} \leq x_2$,则怀疑度公式的值增大;若 $n_{ep} > x_2$,则怀疑度公式的值减少,为“ T_3 -不确定型”怀疑度计算公式.

4.4 讨论

王建峰等人^[8]提出了基于组合测试数据执行结果的软件错误定位方法.而陈翔和王克朝在错误定位研究进展中也指出了偶然正确性对软件错误定位效率的影响^[9,10].Masri等人^[1]的研究表明去除偶然正确性对基于程序谱的错误定位方法是一种安全缩减因素,也就是说,去除偶然正确性后怀疑度公式值将变大,他们调查了Jaccard, Tarantula, AMPLE和Ochiai共4个怀疑度计算公式去除偶然正确性的影响后怀疑度值增大,但是没有考虑其他怀疑度计算公式受偶然正确性的影响.我们的理论研究表明30个怀疑度公式中的23个公式去除偶然正确性后怀疑度值增大,其中包括Masri在文献[1]中证明的4个公式.然而,我们的理论分析还表明30个怀疑度公式中的5个公式不受偶然正确性影

响,另外,2个怀疑度计算公式受偶然正确性的影响不确定。

5 小结

主要理论分析怀疑度计算公式受偶然正确性的影响,通过理论分析发现,这些怀疑度计算公式受偶然正确性的影响不同。主要分为4类:第1类怀疑度计算公式去除偶然正确性后,怀疑度值有所提升(“ T_1 -提升型”);第2类怀疑度计算公式去除偶然正确性后,怀疑度值不变化(“ T_2 -不变型”);第3类怀疑度计算公式去除偶然正确性后,怀疑度值的变化需要分情况讨论(“ T_3 -不确定型”);第4类怀疑度计算公式去除偶然正确性后,怀疑度值降低(“ T_4 -降低型”)。对于研究的30个怀疑度计算公式其中23个为“ T_1 -提升型”,5个公式为“ T_2 -不变型”,2个公式为“ T_3 -不确定型”怀疑度计算公式。怀疑度公式值的增加不会降低错误定位的效率,从而去除偶然正确性对错误定位方法来说是安全缩减因素。偶然正确性对错误定位影响已存在多年,但很少有对该问题的理论分析,本文研究是偶然正确性对怀疑度计算公式影响有益理论探索,对今后研究偶然正确性起到积极引导作用。

参考文献

- [1] Masri Wes, Assi Rawad Abou. Prevalence of coincidental correctness and mitigation of its impact on fault localization [J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, 2014, 23(1): 1–28.
- [2] Lee Hua Jie, Naish Lee, Ramamohanarao Kotagiri. Study of the relationship of bug consistency with respect to performance of spectra metrics [A]. Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology [C]. Beijing, China: IEEE, 2009. 501–508.
- [3] Naish Lee, Lee Hua Jie, Ramamohanarao Kotagiri. A model for spectra-based software diagnosis [J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, 2011, 20(3): 11–43.
- [4] Xie Xiaoyuan, Chen Tsong Yueh, Xu Baowen. A theoretical analysis of the risk evaluation formulas for spectrum-based fault localization [J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, 2013, 22(4): 1–40.
- [5] Xie Xiaoyuan, Kuo Fei-Ching, Harman Mark. Provably optimal and human-competitive results in sbse for spectrum based fault localisation [A]. Search Based Software Engineering [C]. Heidelberg: Springer, 2013. 224–238.
- [6] Yoo Shin. Evolving human competitive spectra-based fault localisation techniques [A]. Proceedings of the 4th International Conference on Search Based Software Engineering [C]. Heidelberg: Springer, 2012. 244–258.
- [7] Masri Wes, Assi Rawad Abou, Fatairi Nour. Enhancing fault localization via multivariate visualization [A]. Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation [C]. Montreal, QC: IEEE, 2012. 737–741.
- [8] 王建峰, 魏长安, 等. 基于错误交互集的组合测试软件故障定位方法 [J]. 电子学报, 2014, 42(6): 1173–1178.
Wang Jianfeng, Wei Chang-an, et al. Locating errors in combinatorial testing using set of possible faulty interactions [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(6): 1173–1178. (in Chinese)
- [9] 陈翔, 鞠小林, 文万志, 顾庆. 基于程序频谱的动态缺陷定位方法研究 [J]. 软件学报, 2015, 26(2): 390–412.
Chen Xiang, Ju Xiao-Lin, Wen Wan-Zhi, Gu Qing. Review of dynamic fault localization approaches based on program spectrum [J]. Journal of Software, 2015, 26(2): 390–412. (in Chinese)
- [10] 王克朝, 王甜甜, 苏小红, 马培军. 软件错误自动定位关键科学问题及研究进展 [J]. 计算机学报, 2015, 38(11): 2262–2278.
Wang Ke-Chao, Wang Tian-Tian, Su Xiao-Hong, Ma Pei-Jun. Key scientific issues and state-art of automatic software fault localization [J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(11): 2262–2278. (in Chinese)

作者简介



曹鹤玲 女, 1980年5月出生于河南南阳。河南工业大学信息科学与工程学院教师, CCF 会员。主要研究领域为软件分析与测试、数据挖掘。
E-mail: caohl@haut.edu.cn



姜淑娟 (通信作者) 女, 1966年12月出生于山东莱阳。现为中国矿业大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师, CCF 会员。主要研究领域为编译技术、软件工程等。
E-mail: shjjjiang@cumt.edu.cn