

仿真软件的被动测试与主动测试互补的研究

赵一丁¹ 刘凤华¹ 郑秋生¹ 楚纪正² 李志民¹

(中原工学院计算机学院 郑州 450007)¹ (北京化工大学信息科学与技术学院 北京 100029)²

摘 要 仿真软件的被动测试和主动测试在实践中都有一些缺点,针对这些缺点提出了被动测试与主动测试互补的具体方法。通过一定的被动机制提前获取实际生产的历史数据,运用技巧提高历史数据测试的有效性。提出的“正推法”、“逆推法”均有效地克服了单纯主动测试和单纯被动测试的缺点,正推法与逆推法的混合在实践中更具灵活性。被动与主动测试的互补混合测试的 BUG 结果数据对于被测仿真软件数学模型参数的修正等方面有较大作用。互补混合的具体过程细节应与整个仿真软件开发过程互相协调。

关键词 软件测试,被动测试,有效数据,仿真,催化裂化

中图法分类号 TP311 **文献标识码** A

Study on Complementation of Passive Testing and Active Testing on Simulation Software

ZHAO Yi-ding¹ LIU Feng-hua¹ ZHENG Qiu-sheng¹ CHU Ji-zheng² LI Zhi-min¹

(School of Computer Science, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)¹

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)²

Abstract There are some disadvantages in passive testing and active testing on simulation software in practice. The details on complementation between passive testing and active testing were proposed aimed at these disadvantages. Historical data can be obtained through certain passive mechanisms from practical data in advance, and the effectiveness of test for the historical data can be improved. Both “orderly method” and “inversion method” can effectively overcome the disadvantages of active testing and passive testing, also the complementation of them is more flexible in practice. BUG data obtained by the test can take great role for modification of parameter in mathematical model of simulation software. Details of the complementary testing should be associated with the development process of simulation software.

Keywords Software testing, Passive testing, Effective data, Simulation, Catalytic cracking

1 引言

在软件测试中,通常采用主动测试方法。虽然可以用经典的主动测试方法设计出科学的测试用例,比如组合测试^[1,2]、可靠性测试^[3-5]都需要大量的测试数据,但一些情况下,需要测试出软件模拟运行结果与真实环境中实际数据的差距,尤其对于仿真软件,要把软件仿真计算结果与实际系统运行结果进行比对,测试出精度^[6]。但是真实系统的操作参数往往不允许随意调整,或者真实系统的数据完整性得不到保证,使得软件测试人员无法客观地进行计算精度方面的测试。一个针对某个生产装置应用成功的仿真软件应用于另一个同类型的生产装置,可能误差会很大,这时如果盲目地推广于其它多个同类型的装置,很可能不同程度地失败,用户在线使用中的风险也可能很大,因此具体生产装置投入使用之前的被动测试很重要。

笔者从 1991 年开始致力于工业仿真计算误差的研究,开发出的生产优化计算软件在不同企业的实际生产现场误差也

不相同^[7,8],为了解决实际问题,进行了长期软件被动测试的研究,并将被动测试技术在催化裂化仿真优化、聚炳稀聚合在线仿真等项目中进行了长期实践,找到了单纯主动测试难以发现的 BUG。

本文针对被动测试的测试目标难以主动控制等缺点,提出事先通过一定的被动机制获取历史真实有效数据,采用被动和主动测试的互补混合的新方法来解决本文第 2 节提出的问题。

2 问题的提出

虽然可以用主动测试方法设计出测试用例,但需要把仿真软件模拟运行的数据和现场真实数据进行比对,然而各实际生产装置的操作参数往往是不允许随意调节的,无法根据测试用例的输入数据要求进行数据比对。显然这种主动测试往往难以实施。

采用被动测试方法,在不干预生产运行的情况下,在实际现场在线接收数据,被动地监视产品的运行。实践中问题也

到稿日期:2012-02-07 返修日期:2012-05-25 本文受国家自然科学基金(71001082)资助。

赵一丁(1967—),男,硕士,副教授,主要研究方向为软件测试、系统仿真、软件工程等,E-mail:sandandwater@sina.com;刘凤华(1972—),女,硕士,副教授,主要研究方向为软件工程等;郑秋生(1965—),男,硕士,教授,主要研究方向为软件工程等;楚纪正(1964—),男,博士后,教授,博士生导师,主要研究方向为系统仿真、软件工程等。

较多;测试的目标难以主动控制,通常不设计测试用例;数据的完整性问题较大;被动测试通常需要花费较长的时间成本。

3 一种被动测试环境的建立及有效测试数据获取

可以在装置生产现场配置一个工作站,在不干预生产运行的情况下,工作站通过一定的被动机制获取实际生产的现场数据,开发程序用于维护处理这些历史参数数据。这个工作站主要完成如下功能:原始历史数据文件的自动添加、历史数据文件的维护、历史数据的查看及统计、有效历史数据的处理等。这样即获取了大量的现场真实历史数据,它们是下面被动测试成功的基础。

3.1 用于被动测试的有效数据

这里提出一个概念“有效历史测试数据”,其定义为:在用户实际生产正常进行时产生的现场参数数据,并且和数据库中已有的历史数据不出现“相同重复”,这样得到的数据集用于测试。

比如中原地区某催化裂化装置实际生产已经有历史数据a、b组,如表1所列。

表1 历史数据

参数名称	单位	历史数据 a	历史数据 b
主风流量	nm ³ /h	2090	2091
再生温度	度	650	651
再生稀相温度	度	680	683
新鲜原料油流率	kg/h	160	160
回炼油浆流率	kg/h	10	10
反应温度	度	513	512.9
反应器压力	kg/cm ²	1.3	1.302
再生滑阀开度	百分比	38	37.8
反应催化剂藏量	吨	31	31.1
待生滑阀开度	百分比	25	24.8
再生器压力	kg/cm ²	1.6	1.605
烟气中氧含量	百分比	0.28	0.277
烟气中 CO 含量	百分比	5.26	5.37

a、b两组数据很接近,根据经验权重系数,认为是“相同重复”。“有效历史测试数据库”中如果已经有a组数据,那么b组数据就是无效的,不再添加到“有效历史测试数据库”中。

从用户工作现场收集了大量的有效历史数据,根据测试方法的要求,从“有效历史测试数据库”中抽出部分数据作为被测软件测试用例的输入数据,相关的真实数据作为测试用例的期望输出结果或测试通过标准。

3.2 这种被动测试中有效历史数据的获取技巧

(1)相对稳定不变的生产数据可以用较少的有效数据来等价划分代表,其它数据被等价滤掉(重复的数据增加了不必要的测试成本)。这样大大减少了有效历史测试数据库的数据量。

(2)在装置实际生产过程中,很多生产工艺数据长时间基本稳定,生产数据是不允许随便调试的,所以真正有效数据不是常有的。各生产装置开工、停工过程中的有效数据比较多,如开工过程中原料进量从无调整到正常生产负荷,反应温度也从大气常温升到指定的工艺指标,其它生产参数也伴随着大范围变化,这些变化过程中大量数据是有效的。

(3)在生产人员根据管理部门指令改变工艺参数的过程中,会产生大量平时难以出现的调试数据,这恰恰提供了有效数据。

(4)生产出现事故及事故处理过程中也产生有效数据。平时不动的一些工艺参数发生变化,操作变量被调整(当然绝

大多数装置生产基本安、稳、长、满、优运行,这样的机会对于有效数据的获取来说也是珍贵的)。

3.3 历史数据的滤干扰及修正

原始数据中也偶尔夹杂有异常失真数据,它们会使被动测试的结果与实际误差很大,也会导致忽略实际使用可能出现的严重错误,导致项目测试返工、成本加大。所以这些数据要滤掉或修正。真实的现场原始数据一般有一定的连续性,某组数据如果不符合这种连续性的经验,很可能是失真异常数据(可能由硬件设备故障等原因导致)。这样可以采用数理统计程序去逐一循环判断其是否是失真数据。

3.4 应尽早建立有效历史测试数据库

这种基于历史数据的被动测试的基础就是有效的历史测试数据库,关键就是数据量和有效性。数据量的充分性制约了被动测试的充分性,而过多的无效数据会加大测试成本。

为了解决这两个问题,应提前建立有效历史测试数据库,比如仿真项目一开始就要考虑着手这项工作,并注意技巧。

4 这种被动测试的优缺点

4.1 优点

综上所述,这种基于大量真实现场历史数据的被动测试的优点显而易见。它能更加准确地计量仿真软件与实际生产的误差,每一组测试输入数据的期望结果或测试通过标准都来源于真实生产历史数据,避免了经典主动测试中期望输出的人工估算误差。

这些数据有时也体现了“经常被用户使用的功能和配置”,从经验来看,被用户经常使用的功能和配置应该是优先的重点的测试目标。

基于长期大量的真实生产历史数据对软件进行可靠性测试更具有优势。即历史数据的量越大、有效性越高,则测试越充分、测试时间成本越低等等。

4.2 缺点

主动测试强调有测试计划,事先确定测试目标范围、测试优先级等,测试实施之前要设计测试用例,可以按照具体测试技术方法设计测试输入数据。而被动测试成功的基础是现场真实数据,这些数据的历史积累是在实际生产过程中跟踪形成,并通过一定的被动机制获取的,不受测试人员人为主动控制。这些有效历史数据往往与我们的主动测试计划不一致,被动测试难以事先计划,完全依赖这些数据的被动测试可能很“随意”,实践中往往不设计测试用例。有时这种被动测试得到的结果并不被认为是优先的测试目标。被动测试也有成本约束,实践中往往不允许过于“随意”。

5 被动测试与主动测试互补的方法

对于上面的被动测试的缺点如何解决呢?这里从实践中总结了被动测试与主动测试优势互补的方法,提出了新方法:正推法及逆推法。其使被动测试的目标受到主动测试的控制,限制测试的“随意”。

5.1 正推法

5.1.1 正推法步骤

- (1)按照主动测试的方法制定测试目标;
- (2)根据测试目标,设计主动测试用例,但其中设计的测试输入数据不需要具体数据,只设计出输入数据的“要求条件范围”;

(3)从有效历史测试数据库中分析抽取符合“要求条件范围”的数据,得到测试用例的输入数据;

(4)从对应的数据中获取测试用例的期望输出数据或测试通过标准。

这样就完成了测试用例的设计。然后按照测试用例模拟运行被测软件,比对模拟运行的结果与有效测试历史数据库中真实数据之间的误差。

5.1.2 正推法应用实际案例

比如在一个催化裂化仿真软件的测试中,我们在测试前期的测试计划中选取了其中一个测试目标:正常工况下再生滑阀开度和待生滑阀开度计算的精度。

根据这个测试目标,从有效历史测试数据库选择了一组符合“要求条件范围”的实际现场数据,如表 2 所列。

表 2 有效历史测试数据库中一组数据

参数名称	单位	实际现场数据
主风流量	nm ³ /h	1990
再生温度	度	650
再生稀相温度	度	680
新鲜原料油流率	kg/h	169
回炼油浆流率	kg/h	10
反应温度	度	513
再生滑阀开度	百分比	38.2
反应器压力	kg/cm ²	1.3
反应催化剂藏量	吨	31
待生滑阀开度	百分比	25.1
再生器压力	kg/cm ²	1.6
烟气中氧含量	百分比	0.28
烟气中 CO 含量	百分比	5.26

经过数据分离处理,把与测试目标无关的烟气中氧含量、烟气中 CO 含量滤掉。

把其中相关的数据(主风流量、再生温度、新鲜原料油流率、回炼油浆流率、反应温度(自动控制)、反应催化剂藏量(自动控制)、再生器压力(自动控制)、反应器压力(自动控制))作为测试输入数据。把对应的再生滑阀开度、待生滑阀开度作为期望输出。

这样,得到测试用例的输入数据及期望输出数据,如表 3 所列。

表 3 测试用例的输入数据及期望输出数据

参数名称	单位	测试输入数据	测试期望输出
主风流量	nm ³ /h	1990	
再生温度	度	650	
再生稀相温度	度	680	
新鲜原料油流率	kg/h	169	
回炼油浆流率	kg/h	10	
反应温度	度	513(自动控制)	
反应器压力	kg/cm ²	1.3(自动控制)	
再生器压力	kg/cm ²	1.6(自动控制)	
反应催化剂藏量	吨	31(自动控制)	
再生滑阀开度	百分比		38.2
待生滑阀开度	百分比		25.1

总之,先制定测试目标,再从有效历史测试数据库搜索相关符合要求条件的数据,经过分析处理之后,得到验证测试目标的测试用例的输入数据及期望输出数据。

5.2 逆推法

5.2.1 逆推法步骤

与上面正推法对应,其大致步骤为:

(1)依次提取分析有效历史测试数据库中的各组数据;

(2)根据有效历史测试数据库中数据的相关性,分析这些数据与哪些可能的测试目标有关系;

(3)选取其中相对重要的测试目标;

(4)根据测试目标把这些数据进行组合,合成测试用例,使其能验证这个测试目标。

5.2.2 逆推法应用实际案例

比如,根据有效历史测试数据库中的表 2 数据可以得到测试目标,并得到如表 4 所列的测试用例的输入及期望输出数据。

测试目标:正常工况下反应器催化剂藏量计算的精度。

表 4 测试用例的输入数据及期望输出表

参数名称	单位	测试用例 输入数据 1	测试用例 输入数据 2
主风流量	nm ³ /h	1990	1990
再生温度	度	650	650
新鲜原料油流率	kg/h	169	169
回炼油浆流率	kg/h	10	10
反应温度	度	513 (自动控制)	513 (自动控制)
再生滑阀开度	百分比	期望输出 (38.2)	期望输出 (38.2)
反应器压力	kg/cm ²	1.3 (自动控制)	1.3 (自动控制)
反应催化剂藏量	吨	31 (自动控制)	期望输出 (31) (手动控制)
待生滑阀开度	百分比	期望输出 (25.1)	25.1
再生器压力	kg/cm ²	1.6 (自动控制)	1.6 (自动控制)

思路概括:直接分析有效历史测试数据库中的数据,由这些数据组合归纳得到相关的测试目标及测试用例。

5.3 正推法与逆推法的一种混合方法

正推法的主要优点是测试目标能够主动选取,缺点是大量的有效历史数据可能没有充分利用。逆推法的主要优点是能充分利用有效历史测试数据库中的数据,缺点是数据量过大,使得人工数据分析的工作量也很大。

需要把正推法和逆推法再进一步混合互补,步骤如下:

(1)按照优先级制定 n 个测试目标;

(2)从 $i=1, \dots, n$ 循环,做如下处理:

用正推法从有效历史测试数据库中选取合理的数据去逐一验证测试目标,并将每次已经使用的记录数据做标记剔除;

(3)对有效历史测试数据库中剩余的未被使用的数据运用逆推法进行分类;

(4)概括出与每一类数据相关的软件功能或性能,分析提取出测试目标并用逆推法测试验证。

这样一方面既能够主动地验证优先的测试目标,另一方面能尽量充分利用有效历史测试数据库中的各组数据,尽量不浪费。实践证明,这种方法更具有灵活性、实效性。

6 这种互补混合测试与仿真软件精度的提高

6.1 开发人员可以用有效历史测试数据库去修正仿真数学模型参数

比如,催化裂化反应是一个非常复杂的工业过程,很难用精确数学模型来描述,大多数的模型都是把原料划分为虚拟组分,集总数增加后,反应速率常数等动力学参数剧增,动力

学参数的实际实验测试工作量也增加了^[7,8,16]。在建立催化裂化仿真数学模型过程中,有一个难点就是模型参数的确定,在一个装置上精度较高的模型在另一个实际生产装置上应用却精度大降(装置因素复杂^[7,16])。即使复杂反应再生生产过程的数据不甚完善,机理不甚清楚,其仍能从有效历史测试数据库中挖掘出有价值的信息以确定仿真数学模型。尽量避开未知机理及过多假设,而与本装置已有的有效历史数据关联,这些有效历史测试数据恰恰正是复杂因素的反映。

可以用数理统计方法从有效历史测试数据库中反推出这些集总动力学模型的参数值,并通过有效历史数据来校正这些模型参数。

这样随着有效历史测试数据库中数据量的增多,参数估计结果也在微调波动。越来越多的有效历史测试数据使得模型参数的精度越来越高。

6.2 用有效历史测试数据库建立经验模型

由于很多工业生产机理复杂,变量较多,相关的机理模型实践效果并不是很满意,因此需要增加经验统计模型。有效历史测试数据库中包含了大量的长期真实现场数据,其可供开发人员采用适当的数理统计方法建立经验统计模型。

而上述的被动与主动互补混合测试发现的 BUG,可以帮助开发人员修改校正经验统计模型。如开发人员在建立经验统计模型时可能会用经典的正交实验法来获取数据。而基于有效历史测试数据库的被动和主动测试的互补混合策略,有时也需要数据均匀分散、齐整可比,也可以采用正交实验法进行测试。这时,互补混合测试和经验数学模型的建立、修正可以相辅相成。

实践证明,这些基于有效历史测试数据库的统计模型虽然没有外推性,但比常规机理模型简便,而且有时针对具体装置的计算精度比常规机理还要准确。

7 被动、主动测试的互补混合过程与仿真软件开发过程的互相协调的经验

被动测试与主动测试的互补混合过程细节,需要和整个仿真软件的开发过程进行有机的协调,这有利于节省开发及测试成本,有利于控制仿真软件开发的过程质量。被动与主动测试的混合细节应根据具体项目的需求及已获取有效历史数据的状况等方面综合确定。

(1) 仿真软件开发项目一启动,就要开始建立有效历史测试数据库,越早,数据越充分。需要提前开发现场生产原始动态数据的自动获取程序,开始时保存数据尽量全面,宁可多余也尽量不要遗漏。

(2) 在仿真软件开发项目的需求分析确认之后,可以对有效测试历史数据库的获取程序进行调整,根据需求去掉无关的数据项,以减少数据量的存储压力。

(3) 在仿真软件开发设计的同时,测试人员可以建立初步的被动与主动互补混合测试的计划,并将其作为软件项目计划的子计划。根据已获取的有效历史测试数据库中的具体数据,可适当地调整测试计划,逐步采用正推法和逆推法的混合方法完善测试用例。过早地进行这一步骤会由于数据相对后期不充分而导致测试用例的过多变更,增加工作量;但也不能过晚,如果仿真程序已经编写完成才进行测试用例的完善,会浪费开发人员的时间,最好不要让开发人员过长时间等待。

测试用例的设计与被测仿真程序基本同时完成或略早一点,往往是我们希望的进度控制结果。

(4) 仿真软件经过一遍测试之后,测试人员要把 BUG 及相关测试数据交给开发人员,由于数据量较大,因此可以更多地采用屏幕拷贝的技巧让开发人员看到原始测试的运行信息,这更有利于 BUG 的原因诊断。开发人员应参与上述互补混合测试的部分过程,因为这种互补混合测试对被测仿真软件精度的提高是大有帮助的。

8 实践结果

8.1 实践情况总结

从 1996 年开始,笔者已经取得了中原地区某石化企业相关生产装置十几年的现场生产有效历史数据^[7],期间先后开发出了多个仿真系统,部分也进行了省部级鉴定;近几年,对催化裂化、聚炳稀聚合等仿真软件依据有效历史测试数据库进行了大量的被动与主动测试的互补混合测试。

经过实践检验,依靠这种被动与主动互补混合测试发现了不少的常规主动测试难以发现的 BUG,软件开发与被动、主动混合测试互相协调、相辅相成,大大提高了软件质量。尤其是一些软件对特定装置生产过程的动态及稳态仿真精度取得了突破性的结果,比如针对某具体的催化裂化装置,与国内外同类软件相比,在原料油来源没有发生极端异常变化的情况下,稳态精度是最高的。随着实际生产的进行,有效历史测试数据越来越多,经过测试而修改的数学模型的精度越高,软件可靠性等质量指标也越高。

8.2 实践案例

如对于某催化裂化装置外取热部分换热量的计算,10 年以前就建立出正常工况下外取热量 y 与外取热催化剂的流量 Gr 及入口催化剂的温度 T_{451} 的统计模型^[7]:

$$y = 0.7[Gr * Sc * (T_{451} - Th_{20})]^2 + 0.9[Gr * Sc * (T_{451} - Th_{20})] + 1.2Gr \quad (1)$$

式中, Th_{20} 为取热盘管水蒸汽温度, Sc 为催化剂比热(正常工况下, Sc 、 Th_{20} 是定量)。

经过正推法、逆推法的混合测试,发现其误差较大,和现场某些数据对比甚至误差达到 5.1%。需要利用有效历史测试数据库中大量的数据来修正该模型,通过最小二乘回归计算式(1)中的各参数,得到精度更高的新模型:

$$y = 0.724[Gr * Sc * (T_{451} - Th_{20})]^2 + 0.912[Gr * Sc * (T_{451} - Th_{20})] + 1.19Gr \quad (2)$$

更重要的是,有一个明显迹象:随着有效历史测试数据的增多,通过校正,对应的仿真精度有波动提高趋势。

结束语 本文将被动测试与主动测试互补混合,提出了新方法:正推法和逆推法,并且认为正推法、逆推法的混合策略在实践中更加具有灵活性、实效性。

被动与主动测试的互补混合测试能更加准确地计量仿真软件与实际生产的误差,在计算精度和可靠性等方面相对于普通的主动测试或被动测试更容易准确找到仿真软件的 BUG。本文定义了新概念“有效历史测试数据”,并采用技巧提高其测试的有效性。被动与主动测试互补混合测试中,有效历史测试数据库是关键,建立时需要重点注意有效性和量的充分性。大量的被动与主动测试的混合测试结果数据,对

(下转第 152 页)

结束语 在协同过滤算法中,相似性度量直接影响到算法的预测精度与推荐质量。在本文提出的基于项目聚类的用户最近邻全局相似性协同过滤算法中,计算项目间的相似性,通过聚类算法将相似性较高的项目聚成一类,在每个聚类项目集合上计算用户之间的局部相似性,形成最近邻用户全局相似度计算方法,以提高相似度和预测评分的准确性。同时还根据用户共同评分的项目数量,引入重叠度因子,并将其融合到计算用户局部相似度的公式中,来进一步加强相似度的准确性。从实验结果可以看出,本文的算法具有比传统推荐算法更好的推荐质量。

参 考 文 献

- [1] Goldberg D, Nichols D, Oki B, et al. Using collaborative filtering to weave an information tapestry [J]. Communications of the ACM, 1992, 35(12): 61-70
- [2] Sarwar B M, Karypis G, Konstan J, et al. Application of dimensionality reduction in recommender system - A Case Study [C]// Proceedings of the ACM Web KDD Web Mining for E-Commerce Workshop. Boston, MA, United States, 2000: 82-90
- [3] Massa P, Avesani P. Trust-Aware Collaborative Filtering for Recommender Systems [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2004, 3290: 492-508
- [4] Vincent S Z, Boi F. Using Hierarchical Clustering for Learning the Ontologies used in Recommendation Systems [C]// Proceedings of the 13th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Jose, California, USA, 2007: 599-608
- [5] Sarwar B M, Karypis G, Konstan J, et al. Item-based collaborative filtering recommendation algorithms [C]// Proceedings of

the 10th International Conference on the World Wide Web. New York, ACM Press, 2001: 285-295

- [6] Sarwar B M. Sparsity, scalability, and distribution in recommender systems [D]. Minneapolis, MN: University of Minnesota, 2001
- [7] Zeng C, Xing C, Zhou L. Similarity measure and instance selection for collaborative filtering [C]// Proceedings of the 12th International Conference on World Wide Web. New York: ACM Press, 2003: 652-658
- [8] Billsus D, Pazzani M J. Learning collaborative information filters [C]// Proceedings of the 15th International Conference on Machine Learning. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1998: 46-54
- [9] Goldberg K, Roeder T, Gupta D, et al. Eigentaste: a constant time collaborative filtering algorithm [J]. Information Retrieval, 2001, 4(2): 133-151
- [10] Aggarwal C C, Wolf J L, Wu K L, et al. Horting hatches an egg: a new graph-theoretic approach to collaborative filtering [C]// Proceedings of the 5th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York, ACM Press, 1999: 201-212
- [11] Papagelis M, Plexousakis D, Kutsuras T. Alleviating the sparsity problem of collaborative filtering using trust inferences [C]// Proceedings of the 3rd International Conference on iTrust 2005. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 224-239
- [12] Ungar L, Foster D. Clustering methods for collaborative filtering [C]// Proceedings of the Workshop on Recommendation Systems at the 15th National Conference on Artificial Intelligence. Menlo Park, CA: AAAI Press, 1998: 112-125

(上接第 124 页)

于仿真数学模型的参数修正作用较大;有效历史测试数据库可供开发人员建立针对性的经验统计模型。这种混合测试应该与仿真软件开发过程互相协调。

参 考 文 献

- [1] 陈翔,顾庆,王新平,等.组合测试研究进展[J].计算机科学, 2010, 37(3): 1-5
- [2] 查日军,张德平,聂长海,等.组合测试数据生成的交叉熵与粒子群算法及比较[J].计算机学报, 2010, 10: 1896-1908
- [3] 赵亮,王建民,孙家广.统计测试的软件可靠性保障能力研究[J].软件学报, 2008, 19(6): 1379-1385
- [4] 陆文,陈锋,吕建.一种开放环境下的软件可靠性评估方法[J].计算机学报, 2010, 3: 452-462
- [5] 张德平,聂长海,徐宝文.软件可靠性评估的重要抽样方法[J].软件学报, 2009(09): 2859-2867
- [6] 吴重光,等.我国石油化工仿真技术 20 年成就与发展[J].系统仿真学报, 2009(21): 6689-6696
- [7] 赵一丁,等. FCCU 反应再生仿真模型的研究[J].计算机仿真, 2007(06): 74-77
- [8] 赵一丁,等.催化反应再生生产在线专家系统研究[J].计算机仿真, 2007(07): 138-141
- [9] Chari K, Hevner A. System test Planning of software: An optimization approach [J]. IEEE Trans on Software Engineering,

2006, 32(7): 503-509

- [10] 顾庆,唐宝,陈道蓄.一种面向测试需求部分覆盖的测试用例集约简技术[J].计算机学报, 2011(5): 879-888
- [11] 姜瑛,辛国茂,单锦辉,等.一种 Web 服务的测试数据自动生成方法[J].计算机学报, 2005(4): 568-577
- [12] 刘新忠,徐高潮,胡亮,等.一种基于约束的变异测试数据生成方法[J].计算机研究与发展, 2011, 4: 617-626
- [13] 刘哲,张为群,肖魏娜.一种基于模糊评估分层模型的构件可测试性评价方法[J].计算机科学, 2011, 38(5): 113-115
- [14] Kuball S, May J. Test-Adequacy and statistical testing: Combining different Properties of atest-set [C]// Proc. of the 1st Intl. Symp. on Software Reliability Engineering (ISSRE 2004). 2004: 161-172
- [15] 路晓丽,董云卫. Web 应用软件的结构测试研究[J].计算机科学, 2010, 37(12): 110-113
- [16] 山红红,等.两段提升管催化裂化技术动力学特点分析[J].中国石油大学学报:自然科学版, 2007(01): 52-56
- [17] Chernak Y. Validating and improving test-case effectiveness [J]. IEEE Software, 2001, 18(1): 81-86
- [18] Miller S D, DeCarlo R A, Mathur A P. Modeling and control of the incremental software test process [C]// Proc. of the 28th Annual Int'l Computer Software and Applications Conf (COMP-SAC 2004). 2004: 156-159