

# J2EE 应用服务器的软件老化测试研究

刘建军<sup>1</sup>, 孟海宁<sup>2</sup>

(1. 中国航空计算技术研究所, 陕西 西安 710068;

2. 西安理工大学 计算机科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 软件老化现象是影响软件可靠性的重要因素, 长期运行的软件系统存在软件老化现象, 这将影响整个业务系统的正常运行, 给企事业单位带来无可估量的经济损失。软件老化出现的主要原因是操作系统资源消耗殆尽, 导致应用系统的性能下降甚至崩溃或宕机。文中监测 J2EE 应用服务器系统资源的使用情况, 考虑外界的负载变化, 检测系统中软件老化现象, 分析系统资源消耗何时达到临界值, 从而帮助软件工程人员及时采取预维护手段, 预防运行时系统中重大故障的发生。

**关键词:** 应用服务器; 软件老化; 软件可靠性

**中图分类号:** TP301

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2014)07-0237-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.07.059

## Research on Testing Software Aging in a J2EE Application Server

LIU Jian-jun<sup>1</sup>, MENG Hai-ning<sup>2</sup>

(1. Aeronautics Computing Technique Research Institute, Xi'an 710068, China;

2. College of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Software aging phenomenon plaguing in many long-running software systems is a contributing factor to impact software reliability and it will affect the normal operation of the whole service system and bring immeasurable economic loss to the enterprise. Software aging is characterized by progressive performance degradation or a sudden hang/crash in long-running software system due to resource exhaustion of operating system. In this paper, through monitoring system resource usage and considering system load variation, the software aging phenomenon in a J2EE application server is investigated to analyze when resource usage reaches the pre-determined threshold. Thus it will help software engineer take measures with preventive maintenance, and prevent the unplanned and expensive future system failures.

**Key words:** application server; software aging; software reliability

## 0 引言

大型软件系统在持续平稳运行一段时间之后, 系统资源大量消耗, 服务性能和质量下降甚至挂起或宕机, 称为软件老化现象<sup>[1]</sup>。软件老化可能造成安全关键系统的重大损失<sup>[2]</sup>, 甚至人员伤亡<sup>[3]</sup>。引起软件老化的原因有内存泄漏、各种类型的逻辑错误、致命的安全缺陷、死锁、状态冲突等<sup>[4]</sup>。

目前, 很多计算系统中已经检测到软件老化现象。文献[5]中指出文件系统中存在软件老化现象, 发现存储空间碎片较多的文件系统存取吞吐量较正常情况下降低40%。文献[6]中, 第一次提出了基于测量方

法估测软件老化情况, 首先监测导致系统低效或宕机的资源, 如内存使用、交换区使用、CPU 占用率、空闲通信通道等, 然后用统计学模型估算和验证软件老化, 根据不同的策略决定是否及何时进行软件维护。文献[7]中, 采用统计模式识别方法, 检测在线事务处理服务器系统中的软件老化现象。文献[8]中, 以响应时间和响应率为系统性能的衡量依据, 考虑负载变化因素, 提出 Web 服务器系统中软件老化的检测方法。文献[9]中, 通过收集 Apache Web 服务器中交换区数据、内存使用量以及响应时间等信息, 利用非参数统计学方法进行老化预测。文献[10]中, 通过收集 Web 服

收稿日期: 2013-10-06

修回日期: 2014-01-08

网络出版时间: 2014-04-24

基金项目: 国家核高基重大专项项目 (2012ZX01041-002-003)

作者简介: 刘建军 (1978-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为软件工程和软件可靠性。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140424.0842.096.html>

务器中的资源使用参数,发现系统性能逐步下降,然后计算系统平均负载时间序列的最大李亚普诺夫指数,证明系统的老化现象具有混沌性。文献[11]针对 Sun HotSpot Java 虚拟机系统,考察系统负载对老化的影响以及系统内存资源和吞吐量的变化,采用统计分析的方法评估系统的老化趋势。文献[12]给出一种基于 AOP(Aspect-Oriented Programming)技术的系统性能监测机制,通过监测服务器系统中每个组件的资源使用情况,从而分析判定引起软件老化的组件。文献[13]分析并研究云计算系统中存在软件老化现象的影响因素,通过监测系统虚拟内存和物理内存的使用情况,发现系统内存资源逐渐消耗、CPU 占有量逐步增加,并且系统响应时间随之增长。此外,常用软件如 Netscape 和 XRN 中也存在软件老化现象。

研究发现,软件的结构和运行环境越来越复杂,软件设计、开发和检测阶段,难以完全排除软件缺陷。另外,很多软件系统的故障是瞬时发生的,通常由于系统过载、资源竞争和异常积累等因素引起,软件运行过程中存在的瞬时 bug 难以捕捉,不能被及时完全地发现,致使突发性故障发生的概率增加。因此,软件老化现象是难以避免的,并且影响软件系统运行的老化指标也很难确定。

软件老化现象主要包括系统资源消耗殆尽、数据破坏及瞬间错误积累等,其中系统资源消耗是软件老化最常见的现象。因而,检测系统中存在的软件老化现象,可帮助软件工程人员及时采取预维护手段,以预防运行时系统中未来重大故障的发生。文献[14]中估算故障率和平均故障时间,预测分布式系统故障。文献[15]中,用错误率阈值和 CPU 使用率阈值作为基本参数,预测故障情况。这些研究都是对系统故障间断点数据进行故障预测,对于 J2EE 应用服务器中的老化问题,仅靠监测和估算故障点数据是不够的。因此,文中周期监测并记录下系统中影响老化的活动参数,按给定间隔时间,提取应用服务器中的系统参数,检测应用服务器系统中的软件老化现象,从而预测系统故障。

## 1 J2EE 架构的应用服务器系统

应用服务器是中间件最大的一个分支,其基于组件的中间层集成框架,为组件的运行提供运行时环境、基础服务和管理等功能。应用服务器位于企业应用与操作系统之间,屏蔽底层操作系统、网络以及数据库的异构性和复杂性,通过组件容器方式提供应用部署、运行平台。图 1 是一个基于 J2EE 平台的应用服务器结构示意图。客户端向应用服务器端提交服务请求,负载分配器根据服务请求的类型分配到合适的 HTTP 服

务器上,然后将服务请求转交给应用服务器上,该应用服务器查询数据库,分析处理服务请求后将结果返回给客户端。J2EE 架构的应用服务器建立在 JVM(Java 虚拟机)之上,JVM 的内存泄露是导致应用服务器老化的一个重要原因,因此需要对 JVM 的内存管理与内存泄漏进行分析。

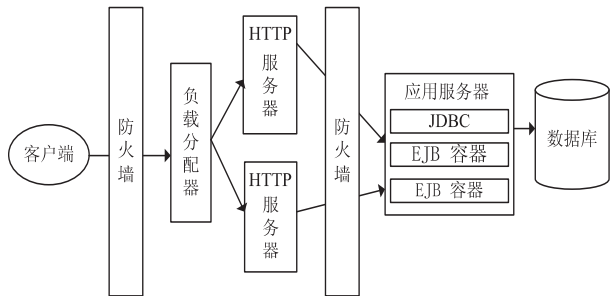


图 1 J2EE 应用服务器体系架构

JVM 内存区域,也叫运行时数据区,分为方法区、堆、栈、寄存器、本地码栈,在 JVM 运行程序时,存储字节码、对象、参数、返回值局部变量以及中间结果等数据。内存堆用来存放 Java 程序运行时创建的类实例或数组。每个虚拟机实例中只存在一个堆空间。JVM 可以为新对象分配内存,但释放内存的任务由垃圾回收机制完成。垃圾回收机制回收不再被引用的无用对象,即当一个对象不再被引用的时候,内存回收它占用的空间,以便腾出空间被后来的新对象使用。但是有些可达的无用对象也可能成为不能回收的垃圾对象,如图 2 所示,垃圾回收机制这种潜在的缺陷造成内存泄漏的出现。

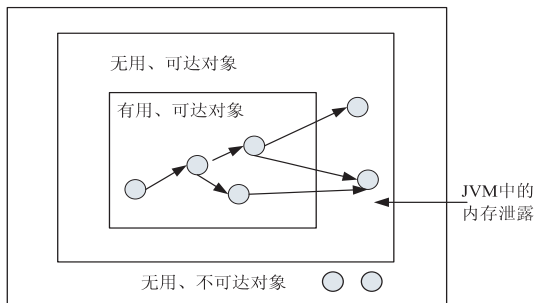


图 2 内存泄露原理图

内存泄漏问题如果不加解决,随着时间的积累,造成 JVM 的内存使用量的持续增加,当 JVM 内存使用达到其最大堆栈大小时,JVM 自动的垃圾回收机制会进行垃圾收集。但每次执行垃圾收集后,无用对象所占的内存释放的百分比相对较小,最终会导致 JVM 连续地进行垃圾回收,占用大量的 CPU 时间,即 CPU 使用率持续增加。而系统资源是有限的,JVM 内存和 CPU 使用率持续增加,最终将导致系统低效或宕机等老化现象。因此,需要专门的工具来实现 JVM 内存监测,提取内存相关信息,程序开发者能比较容易地判断程序是否有内存泄漏及其产生的原由,从而更好地进行

软件老化现象的分析。

2 J2EE 应用服务器老化测试和分析

2.1 实验环境

测试的实验环境包括 J2EE 应用服务器和数据库服务器,运行在同一个局域网内,通过 100 Mbps 局域网连接,每个机器的配置为 P4 2.4 G Intel CPU,运行环境采用 Sun JDK Hotspot 1.4.1\_02-b06。测试时首先在 IBM 的应用服务器 Websphere Application Server 5.1 上部署测试用例 Petstore 1.3.1-02,同时模拟多用户请求的应用客户端远程调用 EJB 模块中业务逻辑方法,业务逻辑方法包括了对数据库服务器中的数据的增加、删除、更新等操作,数据库系统是 IBM 的 CloudScape4.0。客户端负载发生器开始发送 SOAP/HTTP 服务请求时,在客户端实时地记录响应时间等系统性能参数信息,同时激活服务器端 Tivoli 性能查看器,记录应用服务器动态参数,基本的调用过程如图 3 所示。负载发生器尽量模拟用户真实情况,采用一个星期为一个周期的形式,区分实际情况工作日和休息日的各个时段负载密度不同,模拟客户在某个小时时间段内服从泊松分布,产生泊松序列的种子可自己设定。

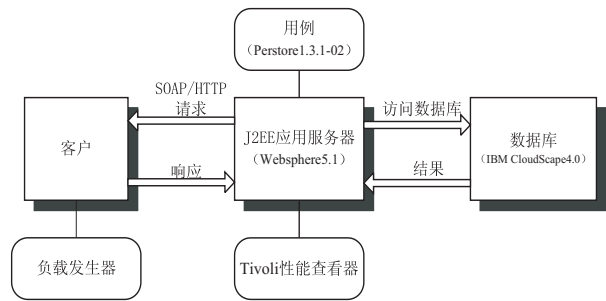


图 3 J2EE 应用服务器软件老化测试拓扑结构

数据采集工具使用 WAS 自带的 Tivoli 性能查看器 (Tivoli Performance Viewer),它可以监控系统资源的使用情况,也可以从 WAS 内部获取 J2EE 架构的服务器中相关参数。采集的数据来自四个模块:JVM 运行时模块,提取 JVM 内存的总大小和使用内存的大小;系统数据模块,提取 CPU 使用率和系统可用内存;Web 线程模块,提取创建的线程总数、破坏的线程总数、并发活动的线程数及线程池的大小;事务管理器,提取开始的全局事务、活动的全局事务、全局事务持续时间及全局事务回滚等。其中,JVM 运行时模块和系统数据模块是最为重要的两个模块。Tivoli 性能查看器和 WAS 同时运行在应用服务器上,占用系统部分资源,采用这种方法得到的老化预测模型实际上是数据采集软件和 J2EE 应用服务器的老化现象叠加。由于 Tivoli 性能查看器占用的系统资源很少,影响程度可以

忽略,可把结果看作是 J2EE 应用服务器老化的结果。

2.2 J2EE 应用服务器的老化测试

为了测试 J2EE 应用服务器中是否存在软件老化现象,分析导致应用服务器老化的原因,设计了不同强度的负载情况,监测应用服务器的运行时参数情况,并进行老化分析。这里,单位时间发送请求的数量和平均服务持续时间是影响负载强度的两个重要因素。应用服务器的负载峰值是指应用服务器在单位时间内能够响应的最大用户数量。首先在较短周期内向服务器发送等值强度的请求任务,同时在客户端记录响应时间等参数信息,若客户端的请求全部得到响应,则增加负载强度,直到出现应用服务器无法响应所有请求时停止,此时的负载强度即为负载峰值。在老化测试时,根据服务器负载峰值设计发送请求的负载强度。

1)重负载测试。

重负载测试中,平均负载强度设定为负载峰值的 30%,其中负载任务高峰期时的负载强度设定为负载峰值的 50%。JVM 内存使用量的初始大小为 128 M,最大值为 256 M。如图 4 所示,随着系统运行时间的推移,应用服务器系统内存使用量逐步增加,最终系统在运行 43 小时后,JVM 内存使用量临近 256 MB,导致 JVM 内存资源不足而出现宕机,此时系统无法响应客户端请求。图 4 中内存使用量变化呈锯齿状,是 JVM 垃圾回收机制作用的结果,当可用内存出现暂时不足,不能满足程序的内存需求时,系统将自动调用垃圾回收机制,释放更多的可用内存空间。然而,随着应用服务器的长期运行,其性能不断下降,JVM 自动内存管理机制所起的作用越来越小,最终导致系统宕机。

为验证应用服务器是否存在老化现象,即系统性能是否随时间的推移而缓慢下降,采用一元线性回归方法,分析 JVM 内存使用量 Y (单位:kB) 和应用服务器运行时间 X (单位:min) 的关系,得到式 (1) 描述的拟合直线方程。

Y=25.852 7 \* X+137 920 (1)

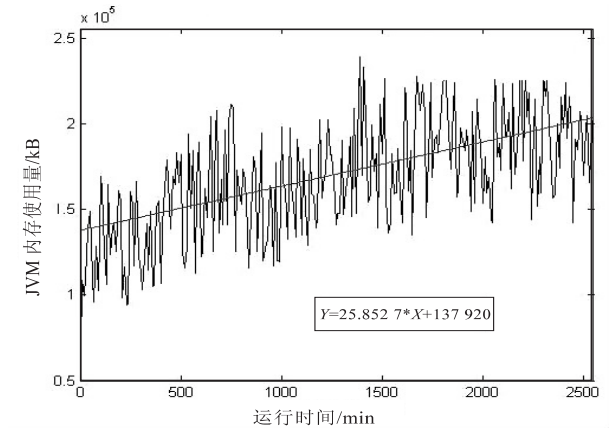


图 4 重负载情况下应用服务器 JVM 内存使用量



式(1)中回归直线的斜率为正,表示 JVM 内存使用量随着应用服务器运行时间的推移而增加,应用服务器存在老化现象。

## 2) 轻负载测试。

轻负载测试中,平均负载强度和负载任务高峰期的负载强度都设定为重负载测试中的 20%。应用服务器 JVM 内存使用情况如图 5 所示。

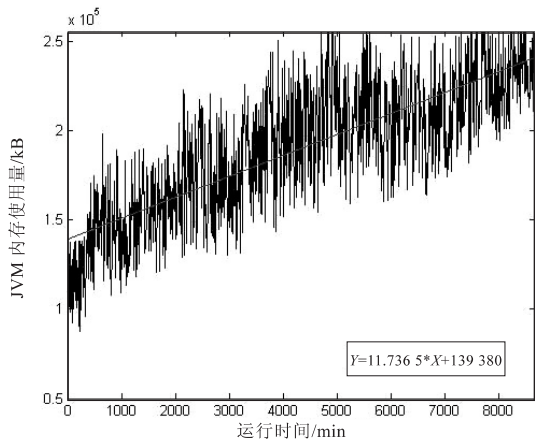


图 5 轻负载情况下应用服务器 JVM 内存使用量

从图中可以看出,与重负载老化测试时情况相似,JVM 内存使用占 250 M 左右时,应用服务器宕机,无法响应客户端请求,此时系统运行 140 小时。可得到内存使用量与服务器运行时间的一元线性关系式:

$$Y = 11.736\ 5 * X + 139\ 380 \quad (2)$$

式(2)中回归直线的斜率为正,意味着内存耗尽引起服务器系统出现软件老化。此外,轻负载老化测试中负载强度减少,应用服务器运行时间增加三倍,可见负载强度是影响软件老化的主要因素。

## 3) 延长平均服务持续时间的老化测试。

此次老化测试中,平均服务持续时间为原来的六倍,且单位时间内发送请求的数量与轻负载测试中相同。应用服务器 JVM 内存使用情况如图 6 所示。

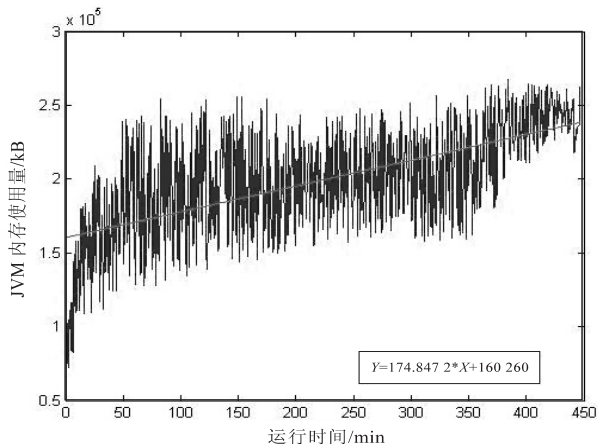


图 6 平均服务持续时间延长后应用服务器 JVM 内存使用量

与前两种老化测试情况相同,JVM 内存使用量在 250 M 左右时,应用服务器系统运行 8 小时后宕机,此时系统无法响应客户端请求。JVM 内存使用量与应用服务器运行时间的一元线性关系如式(3)。

$$Y = 174.847\ 2 * X + 160\ 260 \quad (3)$$

式(3)中回归直线的斜率为正,且斜率较上述两种情况增幅较大。这是因为延长服务持续时间,意味着应用服务器中 EJB 容器需为用户较长时间保留系统资源,这将加速耗尽应用服务器的系统资源,从而加快软件老化速度。

## 3 结束语

文中监测 J2EE 应用服务器系统中的资源使用情况,考虑外界负载变化,收集系统资源消耗的数据,检测系统的老化现象,分析系统资源消耗何时达到临界值,以帮助软件工程人员及时采取预维护手段,预防运行时系统中未来重大故障的发生。

下一步工作包括对系统老化机理和软件再生随机模型的研究。

## 参考文献:

- [1] Avritzer A, Weyuker E J. Monitoring smoothly degrading systems for increased dependability[J]. Empirical Software Engineering, 1991, 2(1): 59-77.
- [2] Jia Yunfei, Zhao Lei, Cai Kaiyuan. A nonlinear approach to modeling of software aging in a web server[C]//Proc of 15th Asia-Pacific software engineering conference. [s. l.]: [s. n.], 2008: 77-84.
- [3] Marshall E. Fatal error: how patriot overlooked a scud[J]. Science, 1992, 255: 1344-1347.
- [4] Huang Y, Kintala C, Kolettis N, et al. Software rejuvenation: analysis, module and application[C]//Proc of IEEE twenty-fifth international symposium on fault-tolerant computing. Pasadena, CA, USA: IEEE, 1995: 381-390.
- [5] Smith K A, Seltzer M I. File system aging-increasing the relevance of file system benchmarks[C]//Proc of ACM SIGMETRICS Conference. [s. l.]: [s. n.], 1997: 203-213.
- [6] Garg S, van Moorsel A, Vaidyanathan K, et al. A methodology for detection and estimation of software aging[C]//Proc of ninth international symposium on software reliability engineering. Paderborn: IEEE, 1998: 283-292.
- [7] Cassidy K J, Gross K C, Malekpour A. Advanced pattern recognition for detection of complex software aging phenomena in online transaction processing servers[C]//Proc of international conference on dependable systems and networks. [s. l.]: IEEE, 2002: 478-482.
- [8] Li L, Vaidyanathan K, Trivedi K S. An approach for estimation of software aging in a web server[C]//Proc of international

习状况较好,而少部分学员学习较差),往往是学员的学习方法不对,需要换个角度去接受学习;在一个班级中出现较少的缺陷,如“2008 年大赛班”中的“未焊透”缺陷,这个缺陷出现原因,是因为该班的这些学员根本就不适合学习该项目。

通过上述两个例子的分析可以看出,通过对一些看似孤立的、杂乱的工作记录进行统计后,再据以分析,就能发现焊接培训中心中一些隐蔽和容易忽略的问题(教学中教与学中的教师教授和学员学习情况),只有这些问题从根本上彻底解决了,中心的管理才能上一个新的台阶,管理才能更具有科学性。因此,焊接培训中心在日常管理中应多应用一些管理方面的工具,例如统计分析和数据挖掘技术,科学地掌握公司培训的教师的教授方法、指导措施和学员的学习情况,及时发现教师是否适合在培训中心施教,学员是否适合学习该项目,从而更好地提高工作效率,缩短培训周期。

### 3 结束语

将描述统计分析技术与推断统计分析技术相结合应用在焊接培训中,能够对焊接水平做监控指导,可以作为综合评估教师教授和学员学习情况的有效手段之一,对教师的教学水平和学员的学习能力以及适应学习的能力做综合掌握和控制,能在一定程度上指导教与学的工作。从而,可以使教师能针对性地进行培训和指导,指导学员选择学习项目,在一定范围内缩短培训周期,提高培训的工作效率。

#### 参考文献:

[1] 黄望芽,陈凌峰. 统计分析技术在无取向电工钢生产中的

(上接第 240 页)

- symposium on empirical software engineering. [s. l.]: IEEE,2002:91-100.
- [9] Grottke M, Li L, Vaidyanathan K, et al. Analysis of software aging in a web server[J]. IEEE Transactions on Reliability,2006,55(3):411-420.
- [10] Jia Y F, Chen X E, Cai K Y. Chaotic analysis of software aging in web server[C]//Proc of the second IEEE international symposium on service-oriented system engineering. Shanghai:IEEE,2006:117-120.
- [11] Cotroneo D, Orlando S, Russo S. Characterizing aging phenomena of the java virtual machine[C]//Proc of 26th IEEE International symposium on reliable distributed systems. Beijing:IEEE,2007:127-136.
- [12] Alonso J, Torres J, Berral J L, et al. J2EE instrumentation for

应用[J]. 研究与开发,2003,20(5):4-6.

- [2] 吴湘颖. 统计分析技术在物业管理中的应用[J]. 现代物业,2008(8):50-51.
- [3] 曾五一,陈珍珍,罗乐勤,等. 统计学概论[M]. 北京:首都经济贸易大学出版社,2003.
- [4] 于秀林,任雪松. 多元统计分析[M]. 北京:中国统计出版社,1999.
- [5] 孙文爽,陈兰祥. 多元统计分析[M]. 北京:北京高等教育出版社,1994.
- [6] 薛海涛,李俊岳,张晓囡,等. 焊接电弧信息测试分析系统[J]. 焊接学报,2003,24(1):19-22.
- [7] Gurney T R. Fatigue of welded structures[M]. 2nd ed. London:Cambridge University Press,1979.
- [8] 陈宝平. 多媒体焊接培训系统的开发与应用[J]. 焊接技术,2004,33(6):70-71.
- [9] 薛金保,邹林,陈小艺,等. 焊接操作计算机模拟系统的研究与开发[J]. 焊接技术,2005,34(S0):56-57.
- [10] Tang Guowei, Gu Guochang. Multi-resolution motion estimation and compensation based on adjacent prediction of frame difference in wavelet domain[J]. Journal of Electronics,2009,26(3):412-416.
- [11] 刘胜长,张翌旻,姜海. 手工电弧焊操作模拟训练系统研究[J]. 科技创新导报,2009(13):89-89.
- [12] 何晓群. 现代统计分析方法与应用[M]. 北京:中国人民大学出版社,1998.
- [13] Fayad U M, Simoudis E. Data mining and knowledge discovery[C]//Proceedings of 1st international conf on KDD and data mining. [s. l.]:[s. n.],1997:32-33.
- [14] Zhang Fangzhou, Zhang Linlin, Wang Dan. Progressive correspondence approach based on edge[C]//Proc of WRI international conference on communication and mobile computing. Yunnan:IEEE,2009:195-197.
- software aging root cause application component determination with AspectJ[C]//Proc of international symposium on parallel & distributed processing, workshops and Phd forum. Atlanta,GA:IEEE,2010:1-8.
- [13] Araujo J, Matos R, Maciel P, et al. Software aging issues on the eucalyptus cloud computing infrastructure[C]//Proc of IEEE international conference on system, man, and cybernetics. Anchorage, AK:IEEE,2011:1411-1416.
- [14] Chillarege R, Biyani S, Rosenthal J. Measurement of failure rate in widely distributed software[C]//Proc of 25th IEEE international symposium on fault-tolerant computing. Pasadena, CA, USA:IEEE,1995:424-433.
- [15] Lin T T Y, Siewiorek D P. Error log analysis: statistical modeling and heuristic trend analysis[J]. IEEE Transactions on Reliability,1990,39(4):419-432.

作者: 刘建军, 孟海宁, [LIU Jian-jun](#), [MENG Hai-ning](#)  
作者单位: 刘建军, [LIU Jian-jun](#)(中国航空计算技术研究所, 陕西 西安, 710068), 孟海宁, [MENG Hai-ning](#)(西安理工大学 计算机科学与工程学院, 陕西 西安, 710048)  
刊名: [计算机技术与发展](#)   
英文刊名: [Computer Technology and Development](#)  
年, 卷(期): 2014(7)

参考文献(15条)

1. [Avritzer A;Weyuker E J](#) [Monitoring smoothly degrading sys-tems for increased dependability](#) 1991(01)  
2. [Jia Yunfei;Zhao Lei;Cai Kaiyuan](#) [A nonlinear approach to modeling of software aging in a web server](#) 2008  
3. [Marshall E](#) [Fatal error:how patriot overlooked a scud](#) 1992  
4. [Huang Y;Kintala C;Kolettis N](#) [Software rejuvenation:a-nalysis,module and application](#) 1995  
5. [Smith K A;Seltzer M I](#) [File system aging-increasing the rele-vance of file system benchmarks](#) 1997  
6. [Garg S;van Moorsel A;Vaidyanathan K](#) [A methodology for detection and estimation of software aging](#) 1998  
7. [Cassidy K J;Gross K C;Malekpour A](#) [Advanced pattern rec-ognition for detection of complex software aging phenomena in online transaction processing servers](#) 2002  
8. [Li L;Vaidyanathan K;Trivedi K S](#) [An approach for estimation of software aging in a web server](#) 2002  
9. [Grottke M;Li L;Vaidyanathan K](#) [Analysis of soft-ware aging in a web server](#) 2006(03)  
10. [Jia Y F;Chen X E;Cai K Y](#) [Chaotic analysis of software ag-ing in web server](#) 2006  
11. [Cotroneo D;Orlando S;Russo S](#) [Characterizing aging phe-nomena of the java virtual machine](#) 2007  
12. [Alonso J;Torres J;Berral J L](#) [J2EE instrumentation for software aging root cause application component determina-tion with AspectJ](#) 2010  
13. [Araujo J;Matos R;Maciel P](#) [Software aging issues on the eucalyptus cloud computing infrastructure](#) 2011  
14. [Chillarege R;Biyani S;Rosenthal J](#) [Measurement of failure rate in widely distributed software](#) 1995  
15. [Lin T T Y;Siewiorek D P](#) [Error log analysis:statistical mod-eling and heuristic trend analysis](#) 1990(04)

引用本文格式: 刘建军. 孟海宁. [LIU Jian-jun](#). [MENG Hai-ning](#) J2 EE应用服务器的软件老化测试研究[期刊论文]-[计算机技术与发展](#) 2014(7)