清 华 大 学

**综 合 论 文 训 练**

题目：基于lkp-test的linux kernel性能分析

系 别：计算机科学与技术系

专 业：计算机科学与技术

姓 名：韩慧阳

指导教师：陈渝 副教授

2016年6月5日

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签 名： 导师签名： 日 期：

# 中文摘要

在几乎所有的主流开源软件中，软件运行出现的问题大致分为两类：非性能缺陷和性能缺陷。其中后者通常具有难以检测、极为影响运行性能、可以通过少量代码更改解决等特点。因此，性能缺陷是开源软件当中（包括linux kernel）不可不引起重视的一点。

目前性能缺陷的精确检测尚没有成熟的技术，而使用lkp-tests(linux kernel performance tests)来进行内核分析，从而发现性能缺陷是一种很有效的方法。不过lkp-tests本身存在测试样例过多，测试冗余程度大等缺陷。

本文将从lkp-tests结果数据中进行一些分析，目的在于帮助改进lkp-tests的测试框架，减少冗余，并检测关键指标随着linux kernel版本的变化模式。lkp-tests是一个由因特尔开源技术中心高级工程师吴峰光建立的linux kernel性能检测框架，其从不同的benchmark、编译器、内核版本出发进行测试，使用不同的指标反映出内核的性能。

**关键词：**lkp-tests；指标；降维；相关性

# ABSTRACT

There are two main problems in almost all the OSS(open source software), non-performance bugs, which is also known as Functional bugs and performance bugs. And the latter usually are hard to detected, have considerable influence on the system performance and could be generally solved by only a few of lines of codes. That is why they should be taken into consideration seriously.

There is no way to detect performance bugs precisely till now, but lkp-tests(linux kernel performance tests) have shown that it can be very helpful in detection of performance bugs. However, lkp-tests is has too many extra tests which are not necessary, and they show quite limited results. It has limited the cost of the tests.

This paper will do some analysis base on results from lkp-tests, aiming to improve the lkp-tests framework and cut down testing cost. And the changing mode of key indicators along with different linux kernel versions will be detected, too.

LKP-Tests is a linux kernel performance testing framework authored by Fengguang Wu, , Senior Engineer @ Intel Open Source Technology Center. It tests a variety of indicators on benchmarks with different kernels and compilers.

**Keywords:** lkp-tests; indicators; Dimensionality reduction; correlation

# 目 录

[第1章 中文摘要 I](#_Toc452934781)

[第2章 ABSTRACT II](#_Toc452934782)

[第3章 目 录 III](#_Toc452934783)

[第1章 引言 1](#_Toc452934784)

[1.1 研究背景 1](#_Toc452934785)

[1.2 研究现状 2](#_Toc452934786)

[1.2.1 降维 2](#_Toc452934790)

[1.2.2 相关性分析 3](#_Toc452934791)

[1.3 结论 4](#_Toc452934792)

[第2章 lkp-tests结果分析概述 5](#_Toc452934793)

[2.1 工作机理 5](#_Toc452934795)

[2.2 结果格式 5](#_Toc452934796)

[2.3 冗余测试简述 7](#_Toc452934797)

[2.3.1 指标性冗余 7](#_Toc452934802)

[2.3.2 配置性冗余 7](#_Toc452934803)

[2.4 一些基本的概念 8](#_Toc452934804)

[2.5 指标降维过程 8](#_Toc452934809)

[2.5.1 数据预处理 8](#_Toc452934810)

[2.5.2 降维 12](#_Toc452934811)

[2.6 指标和配置的相关性分析 13](#_Toc452934812)

[2.6.1 单个benchmark的指标相关性分析 13](#_Toc452934813)

[2.6.2 不同benchmark之间配置的相关性分析 14](#_Toc452934814)

[2.7 指标变化模式的分析 15](#_Toc452934815)

[第3章 实验过程 16](#_Toc452934816)

[3.1 实验环境 16](#_Toc452934820)

[3.2 指标降维过程 16](#_Toc452934821)

[3.2.1 数据预处理 16](#_Toc452934822)

[3.3 指标和配置的相关性分析 22](#_Toc452934825)

[3.3.1 单个benchmark的指标相关性分析 22](#_Toc452934826)

[3.3.2 不同benchmark之间配置的相关性分析 23](#_Toc452934827)

[3.4 指标化模式的分析 26](#_Toc452934828)

[第4章 结论 27](#_Toc452934829)

[4.1 工作总结 27](#_Toc452934834)

[4.2 目前的问题与未来的工作 27](#_Toc452934835)

[第5章 插图索引 28](#_Toc452934836)

[第6章 表格索引 29](#_Toc452934837)

[第7章 参考文献 30](#_Toc452934838)

[第8章 致谢 32](#_Toc452934839)

[第9章 声明 33](#_Toc452934840)

[第10章 附录A 外文资料的书面翻译 34](#_Toc452934841)

[第11章 附录B 参考内容 50](#_Toc452934842)

# 引言

## 研究背景

随着互联网技术的高速发展，传统的面对面工作方式对于软件产业来说已经变得不再必需，多数开源软件的开发过程都涉及了大量的开发人员。这些开发者，通常都是通过版本控制系统(VCS)和email进行交流。因此，开源软件通常具有员工工作选择自由度大、整个软件没有严格的系统级设计、没有明确的项目规划时间表等常见问题的出现(2)。目前传统的软件问题，也就是功能性缺陷几乎都是通过随机黑盒测试检测出的，而性能缺陷通常不会直接造成系统的崩溃或者错误，而是体现在降低吞吐量、增加延迟、浪费资源上面，所以既难以检测，又会造成大型项目的整体漏洞的出现(4)。

鉴于性能缺陷对系统整体影响巨大，有很多的性能缺陷检测的方法提出(5)(6)(7)，

纵观目前提出的这几种方法符号标记(5)、缺陷追踪(7)、负载测试(6)，能大规模推广的仍然是与传统黑盒测试相似的负载测试方法，而lkp tests正是针对linux kernel建立的测试框架，为各种研究linux kernel性能缺陷的工作提供了海量的数据基础。

当然，lkp-tests还是一个很新的框架，里面存在着很多冗余、无效甚至是错误的地方，这对我们后续的性能缺陷检测造成了很大的困扰，目前我们发现的lkp-tests的问题主要存在于以下三个方面：

* 测试样例设置过多

目前lkp-tests中有多达130K个不同的指标，然而根据后续对数据的观察和理解，这些指标之间往往并不是相互独立地从不同维度测试系统，很多时候它们之间存在着很大的相关性。这说明部分指标的测试有时候是没有必要的，至少是价值并没有那么大。

指标的冗余是其一，另外lkp-tests还设置了benchmark、内存、linux发行版本、文件系统、内核版本、编译器版本、内核commit ID等等许多不同配置，这些配置的每一个组合就是一个完整的测试。有些时候，这些配置之间也存在冗余的现象，比如，如果两个不同的测试主要测试的是CPU吞吐率，但是两个不同的linux发行版本之间的CPU吞吐率并没有任何改进，这样两个测试其实得到的数据应该是差不多的，其中一个测试是冗余的。

这是lkp-tests的冗余目前存在的地方。

* 测试样例相关性不明

lkp-tests力求测试全面，所以尽量选取多的benchmark和指标，这样虽然能确保包含有用的数据，但是由于冗余的存在和设计之初意义的不明，实际操作的时候很难从中取出真正有用的数据。

不同的测试样例、benchmark、配置之间的相关性与冗余性分析是分不开的，相关性大的，一般会存在冗余。不过相关性分析会使我们对单次测试或者benchmark的意义和测试目的有更加清晰的理解。

* 不同的测试指标数据自身的变化会误导性能缺陷的检测

lkp-tests的其中一个配置信息就是linux 内核的commit ID，随着commit ID的变化，可以绘制一条指标变化的曲线，根据指标变化的模式，也许可以从中分析出性能缺陷存在的位置。比如运行时间的不规则增长。其中的“不规则”的定义是一个难点，运行时间随着系统内核的变迁有时候有自身的变化模式，怎么认定这一次变化是自身变化模式引起的还是由性能缺陷引起的又是一个需要解决的问题。

## 研究现状

目前，因为lkp tests框架本身比较新，针对其进行的优化工作几乎没有，但是根据前面的介绍我们知道我们需要的主要是针对冗余测试样例的处理和离散数据变化模式的识别。针对于冗余测试的处理和相关性检测，我们需要以下几个方面的技术：



### 降维

降维是机器学习和数据挖掘中经常用到的一个概念，通常指的是减少需要考虑的随机变量的数目的过程，最终获得一组“不相关”的变量。通常降维的过程会分为特征选择和特征提取两个主要步骤，后者是降维处理的重点。其实是一种高维数据转化为一种有意义的表示的过程，理想情况下，对应于源数据，降维后的数据通常会有一个固定的维数(8)。

随着大数据时代的到来，诸如语音信号、数字照片、核磁共振成像扫描等技术产生了大量高维数据，因此降维的技术也应运而生。当前比较流行的降维算法有针对线性变化数据的PCA(Principle Component Analysis)算法(8) 即主成分分析和LDA(Linear Discriminant Analysis)即线性判别分析；也有针对非线性变化数据的LLE(Locally linear embedding)即局部线性嵌入和LE(Laplacian Eigenmap)即拉普拉斯特征映射。

#### PCA

PCA又称主成分分析，其主要思想是将高维数据投影到一个低维空间，使投影到这个低维空间之后原数据的方差能得到最大化的保留，这样可以使用低维空间来表示原来的高维数据(10)。并且“与小波变换相比，PCA能够更好地处理稀疏数据”(10, p102)，这一点将成为我们后续选择的时候的重要依据。

#### LDA

LDA也是一种线性降维方法，它与PCA相比有相似之处，同样也是寻找一个可以投影的轴，但是PCA侧重于保留数据信息，LDA侧重于将不同类的数据分离开。所以忽略了一些信息，比起PCA来说，丢掉了更多的信息(15)。

#### LLE

和以上两种方法不同，LLE是一种非线性的降维方法，它是从图形的角度出发去分析数据特点，所以该方法的特点在于投影到低维空间之后，数据还能保留高维数据的流型结构。但是有的时候LLE是不适用的（比如数据平均分布在一个椭球面或者圆球面上），所以应用不是非常广泛(14)。

#### LE

LE的思想与LLE有相似之处，但是它的主要特征是降维之后，原来有关系的数据点还能够相近(13)。

### 相关性分析

相关性分析已经是一个很成熟的技术了，这里我们实际需要的是离散数据的相关性分析（而且这种离散的数据中通常有缺失值）。目前比较流行的衡量两组数据离散相关性的方法是使用Pearson相关系数和Spearman相关系数。两者的区别如下表所示 (16)：

表1：Pearson相关系数和Spearman相关系数的对比

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Pearson | Spearman |
| 数据集要求 | 正态分布 | 没有要求 |
| 分析来源 | 数据的均值方差，属于积差相关值 | 排序值 |
| 衡量侧重点 | 线性相关性 | 非线性相关性 |
| 参数要求 | 参数统计法 | 非参数统计法，需额外选择度量参数 |

另外，根据Jan(16)等的分析，“不要把Spearman相关性系数作为一个关键性的衡量指标进行过度解读”(16，p6)。我们会在之后根据二者的特点和数据的特征进行挑选。

## 结论

综上所述，lkp-tests目前由于性能缺陷本身难以检测存在大量的冗余测试，而且内部测试测相关性不明，另外由于随着linux内核开发版本的变化，数据本身会有自身的变化模式，这种变化往往会误导我们进行性能缺陷的分析。冗余性测试和变化模式的检测是两个亟待解决的问题。

# lkp-tests结果分析概述

本文的研究工作都是基于lkp-tests的测试结果进行的，在这里先对其进行一些基本的介绍。



## 工作机理

lkp-tests选择了一系列的benchmark作为自己测试的工具，在每个benchmark中又会分为不同的硬件配置、文件系统、compiler、内核版本等等。最终的测试是用不同侧重点的指标来展现的。一次测试通常需要经过以下流程：

1. setup-local
   1. make\_wakeup
   2. create\_lkp\_dirs
   3. create\_host\_config
   4. install\_packages
   5. Iterate over scripts
2. run-local
3. run-job
4. post-run
5. extract-stats

以上过程的原理是先在本地启动，进行初始化处理，比如创建本地目录等准备工作；然后，进行本地运行，生成一个job.yaml文件，这个文件是我们这次测试的配置信息，包含了各项配置参数和将要测试的指标；最后一步是提取测试结果，将job.yaml的运行结果从lkp-tests的目录下提取出来，最后是以一个matri.json文件的形式给出的。

## 结果格式

lkp-tests的测试结果由三部分组成，matrix.json、job.yaml还有一个文本文件。三个结果文件的存储路径为（以ebizzy的一次测试结果为例）：

|  |
| --- |
| /result/ebizzy/100%-10x-10s/lkp-ws02/eywa-rootfs/x86\_64-rhel/gcc-4.9/6a13feb9c82803e2b815eca72fa7a9f5561d7861/ |

上面路径中的每一个目录都有其存在的实际意义，依次为：

|  |
| --- |
| 结果根目录/benchmark名/硬件配置/负载/linux发行版、文件系统/内核版本/编译器版本/commit ID |

其中的文本文件是对本次测试的一次描述，而job.yaml是本次测试运行的工作，所以实际的测试结果只存在matrix.json中。下面用一个样例文件来介绍结果的具体格式：

|  |
| --- |
| {  "uptime.boot": [  179.89,  240.59,  278.72  ],  "uptime.idle": [  1868.05,  3320.11,  4214.25  ],  "numa-numastat.node0.numa\_hit": [  277959267,  273755067,  289353920  ],  } |

如上表所示，是一个原始数据中的matrix.json的片段。该样例来自于ebizzy（其中一个benchmark）。观察文件的格式，结果文件的键都是字符串，值是一个列表，表里的内容是一个个的浮点数。其中的键代表测试指标，比如上面的第一条记录键是”uptime.boot”，指的是本次测试的uptime.boot；通常为了避免测试失败，一个完整的配置对应几次重复测试，上面的例子就是三次重复测试。

上面文件节选的意思是“在ebizzy中对应一个完整配置，做了三次重复测试，其中测了三个指标，分别是uptime.boot、uptime.idle和numa-numastat.node0.numa\_hit，三次测试中三个指标的数值如上表所示”。

## 冗余测试简述

前面已经说过，本文的其中一部分工作就是减除冗余的数据，那么什么是冗余的数据呢？

根据数据格式，冗余数据可以分为指标性的冗余和配置性的冗余。



### 指标性冗余

一次测试中可能包含很多不同的指标（作为单独一个benchmark，ebizzy测试指标超过13000个），那么是不是每个指标都是有意义的就是一件值得思考的问题，也许有很多指标都在测试系统的本地I/O，他们之间存在很强的相关关系，比如一个指标测试的是系统一分钟接受的任务数目，另一个指标测试的是系统十分钟接受的任务数目，两者是完全成比例的，也就是说只要给定其中一个就可以计算出另外一个。这时就可以认为其中一个是冗余的。

### 配置性冗余

另外根据之前对路径的解释（表1、表2），可以看到，一次完整的测试对应的是一个完整的配置（benchmark、硬件配置、负载、文件系统、linux发行版、内核版本、编译器版本、commit ID）。对于同一个benchmark而言，如果两个配置的测试结果几乎没有差别，那么可以认为其中一个配置是冗余的。比如说，假如一个benchmark主要测试的是系统的本地I/O，两个配置出了commit ID意外都是一样的，但是两次commit的差别仅仅是改变了网络应用的速度，对于本地的I/O没有任何影响，也就是说两次测试结果完全是一样的，那么可以将其中一个配置认定为是冗余配置。

另外，由于完整配置包含的维度较高，所以，其组合数目很多，配置数目巨大，这样对应到每一个配置的测试次数就会很少，所以比较的时候很有可能会因为结果数据量太小而没有说服力。所以，根据需要，文章调整了配置冗余性的相关性分析方式，放弃对比完整的配置，而对比单一配置信息。

除此之外，不同benchmark之间也会存在这样的冗余配置，比如两个benchmark测试侧重点不同，但是都有本地I/O速率的测试，两个配置仅仅表现为benchmark的不同，其实内部测试都是一样的，那么这两个配置中可以认定其中一个为冗余配置。具体哪一个为冗余还需要具体的观察才能判断。

## 一些基本的概念

表2：一些基本的概念

|  |  |
| --- | --- |
| 指标 | 测试里结果json文件中的键，是一个字符串 |
| benchmark | 测试所用到的软件框架 |
| KPI(Key Performance Index) | 即关键性能指标，指标中的一个，每一个benchmark会有一个或多个KPI，是该benchmark主要测试并体现的指标 |
| 准KPI（pan-KPI） | 除KPI之外的以本benchmark名字开头并以“.”开头的指标，是KPI的候选 |



## 指标降维过程

### 数据预处理

数据的预处理指的是数据的提取和数据的清洗。

* 数据提取

从源数据中提取数据，进行整合，方便分析。

* 数据清洗

将源数据中的无效数据清除，保证结果的正确性。

#### 数据的提取

提取数据的目的是为了更好地进行更好地分析，所以提取的时候要保证数据的完整性和计算的便捷性，另外由于数据量巨大，还要保证数据提取过程的快速、准确。

##### 提取结果格式的选择

数据提取的目的是方便查询、计算，那么提取后的数据就不能再直接存储在磁盘上，要选择一种方便查询的文件格式。该文件格式要满足轻便性、便捷性。

轻便性主要是因为数据总量大，如果增加不必要的冗余信息那么存储成本太高，运算的时候也不便取用，所以必须要是纯文本格式的文件。常用的有json、csv、yaml、xml等等。

便捷性指的是符合数据特点，方便运算，无论是提取和解析的过程都要求快捷，不会消耗太多时间，另外很重要的一点就是现有框架多，做起来会很节省时间。综合考虑以上几点，我选择了csv格式文件作为数据提取之后的存储格式，主要是它有以下两点优点：

* 表格形式存储

符合数据结果的形式，指标和测试结果的对应

* 通用性强，python和R语言都有现成的处理库

csv格式是一个用法广泛的数据格式，python和R语言都有相关的程序包，由于我的数据提取和处理使用的是python，数据分析使用的是python和R语言，所以使用csv将会非常方便。

##### 数据格式的设计

本文选用了csv格式的文件，相对于其他的纯文本存储格式，主要是因为它作为一个表格的形式，方便计算，下面将从后续的数据处理的角度出发设计csv文件的式。

* 必要的存储信息

由于我们需要进行指标和配置的去冗余和想关性分析，所以配置信息和各个指标都需要存储。

* 格式的设计

根据后续的计算需要，csv文件格式设计如下表所示：

表3：csv文件的格式

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| benchmark | c1 | c2 | | filesystem | kernel | compiler | commit ID | Update.boot |
| aim7 | 100%-10x-10s | lkp-ws02 | eywa-rootfs | | x86\_64-rhel | gcc-4.9 | 6a13feb9c82803e2b815eca72fa7a9f5561d7861 | 179.89 |

上表中，第一行是表头，分别表示该列的内容，最后一个update.boot是一个指标，后面还有很多列，表示的是不用的指标。从第二行开始，每一行都是一次完整的配置的测试结果。前面七个单元格的数据是配置信息，后面是测试的结果。

这样的设计是根据python和R语言的读取特点安排的，python和R都是读取一行，所以每行都能够读到一个完整的测试。

* 文件的划分

提取过程的输入是源文件，输出是csv文件，但是csv文件输出的格式却有待斟酌。最容易的是把所有的测试结果整合到一整个csv文件中。

这种策略存在一个问题，csv表格生成后会是一个大小8G以上的文件，我要去访问这样一个大文件，效率自然很慢。另外根据后面的测试（虽然有效率问题，但是还是尝试了一下），该表格是一个十分稀疏的矩阵，也就是说存储存在大量的冗余，而且，因为benchmark之间指标很多都不相同，导致直接对所有benchmark指标进行降维分析不可行。

统计显示，在所有的78个benchmark中，总共测试的指标有130000以上，但是没有任何一个指标是在所有78个benchmark中都出现的，因为其中有些指标只有在特定的benchmark里才有。甚至出现在10个以上benchmark里的指标仅有不到10个。

强行进行降维会遇到有大量的空值存在，对于空值的处理，常见的做法无非是填补和忽略(10)，无论哪一种都会对结果的正确性造成影响。如果进行填补数据，那么无论采取哪一种填补手段，都会面临填补数据过多，那么导致数据过于扁平（缺乏变化），对降维的效果影响很大。如果采用忽略的方法，那么数据会有相当一部分失效，实验之前我们并不知道哪一些指标是关键的，所以这样做是得不偿失的。

因此我们改变思路，把所有benchmark的指标整合改成单个benchmark内部整理为一个csv文件。经过后面的测试，单个benchmark之间的指标有很大一部分是重合的。以ebizzy为例，总共测试了5238个指标，其中以KPI为ebizzy.throughput，准KPI有17个，这17个准KPI中有15个与KPI的指标重合数目都在3000以上，这时我们选择性忽略进行降维或者之后的指标相关性分析才比较可信。因为尚有近2000的指标不是重合的，所以忽略显得更有说服力。

通过这个例子，我们可以确定，直接将所有数据进行整合并分析处理不仅操作难度大，而且结果准确性又低，然而将benchmark分别整合数据则可以同时解决上面的难题。因此，本文最终选择将结果文件的输出从一整个csv文件改为每个benchmark一个csv文件。并且把整体的指标降维和相关性分析改为单个benchmark内部进行数据整合和降维以及相关性分析的处理。

##### 数据提取过程

上面的分析明确了分benchmark提取数据的思路，现在来具体分析如何实施。数据提取的第一步需要知道所有数据的路径，我们可以通过暴力搜索，将所有文件的路径扫描一遍来整合，但是无疑这样消耗大量时间。另外一个方法是我们预先获取文件的路径，然后根据路径找文件速度回快很多。

因此提取数据的第一步：

* 建立索引表

在result目录下，可以通过find命令找到所有的matrix.json文件，将其分benchmark存储到文本中。

提取的第二步，使用Python脚本按照上述文本中的文件索引表去访问文件，将matrix.json文件一一整合到csv文件中。根据后面的工作我发现，提取一个benchmark往往会耗费很多时间，而且运行时间每个benchmark并不是相同的，含有较多和较大的结果文件的benchmark的提取过程会很慢，从而影响后面本来会很快的提取，串行提取一次需要48小时以上，如果中间过程出错或者出现宕机、断电等不可控因素，调试成本太高。又因为benchmark的提取过程是相互独立的，所以很自然就想到可使用并行计算的方式进行加速。于是可充分利用多线程多核优势进行并行加速。

* 并行加速，提取结果

结果文件中往往有多次重复测试的结果，这些结果之间通常不能表现出差异性，所以提取的时候本文将重复测试的数据取均值，降低了存储的成本。

#### 数据清洗

不可否认，本文使用的源数据是存在坏数据的，坏的数据会因为其格式原因，对提取过程造成影响，所以提取的数据以及提取数据过程中都需要数据的过滤清洗，以防止其对后来的研究造成困扰。任何提取之前都应该加上必要的格式检查步骤，如果该文件的格式不合适（比如同一结果文件中部分指标少了几次测试，json数据不完整等等），直接放弃整个结果文件。

另外，测试结果中有大量的bool值存在，因为其只有0和1的变化，所以会影响以浮点数为主的其他测试，因此bool值在降维过程中需要选择性忽略。

由于指标涉及面很广，有的指标测试结果也许在数值上很大，但是变化却不大，如10000~11000，变换了1000，但是只变了10%而已。而100变到150只增加了50，但却是变化了50%，这样的变化显然更有分析的价值。为了杜绝因为数据的绝对数值引起的指标间的地位不均衡，需要对数据进行归一化然后再降维。

归一化也有很多的方法，如均值-方差归一、最值归一、三角归一，因为这里以数据的变化为重，所以选择线性的最值归一法既方便又不影响实验结果。最值归一指的是将数据中出现的最小值设置为0，最大值设置为1，其他值进行线性变换投影到0、1之间。

### 降维

#### 算法的选择

引言的研究现状部分已经介绍了一些降维的算法：主成分分析PCA、线性判别分析LDA、局部线性嵌入LLE和拉普拉斯特征映射LE(Laplacian Eigenmap)。其中可以先排除掉后面的两种非线性降维算法，只比较PCA和LDA。前文提到，PCA是线性降维算法中对源数据保留最充分的一个降维算法，因为降维之前我们已经选择性忽略掉一些不共存的指标，所以LDA会放大这一特点。另外PCA的结果特点更适合我们降维的目的，综上，本文选择PCA作为降维算法。

#### 降维步骤

降维的时候设计到对csv文件的大量读取和计算，且使用Python的话，PCA算法需要重新写，效率上会再打折扣，因此，在这里本文放弃Python，在降维上选择更适合数据分析的R语言。R语言有可用的PCA算法包，对csv文件的处理速度也更快，做降维比较方便。

PCA算法的过程是寻找一个低维空间，使得高维数据映射到其中时能够保留最大的方差。因此，方差保留率是衡量PCA效果的一个重要的因素，我们先设定85%、90%、95%的方差保留率为三个阶梯值，根据实际降维效果选择。

PCA算法的输出是一个低维空间，对应少数几个主成分，该主成分不是源数据中的指标，而是是其中指标的线性组合，所以主成分本身没有实际意义，但是不同的指标与主城分的相关度是不同的，所以一个主成分可以选择与其相关性较大的一个或几个指标作为自己的代表。

完成以上的步骤，源数据就被我们转换为了由少数几个指标代表的低维数据，观察上会方便很多。

## 指标和配置的相关性分析

### 单个benchmark的指标相关性分析

经过上面的降维处理，我们可以分析剩下的这些代表主城分的指标之间的相关性，同时也能够分析没有进行降维的指标之间的相关性，二者对比对理解性能指标会更有价值。

#### 相关性算法的选择

前文已经介绍过了两个主要的相关性衡量体系，Spearman相关系数和Pearson相关系数。根据数据来源已经有了相关参数的特点，本文选择Pearson相关系数作为我们的相关性衡量标准。

#### 相关性分析

同样的benchmark之间指标相关性分析理论上最好的是两两对比，但是数据规模较大（单是ebizzy就有指标5238个），但是计算的结果却不是很有意义，因为这样不能突出benchmark的关键测试。两个测试次数都很少的指标相关性也许很高，甚至会是1（测试次数都很少，恰好又是一样的结果），但是他们并不能体现出自己是重要的指标。所以找一个必要的数据标准进行相关性分析是很有必要的。

幸运的是，lkp-tests官方给出了一些benchmark的KPI，这些指标在一定程度上反映出了该benchmark测试的侧重点，因此选择KPI作为相关性检验的标准是可信的。最后相关性分析的结果应该是一个浮点数表格，每一个指标对应于KPI都有一个相关系数，这个系数衡量了它与KPI的相关性，对理解性能指标很有价值。

### 不同benchmark之间配置的相关性分析

关于配置的相关性分析，首先需要再观察一下配置的格式（即结果文件的路径）：

|  |
| --- |
| /result/ebizzy/100%-10x-10s/lkp-ws02/eywa-rootfs/x86\_64-rhel/gcc-4.9/6a13feb9c82803e2b815eca72fa7a9f5561d7861/ |

因为是在不同benchmark之间的比较，因此其中的result和benchmark可认为不是配置的一部分。所以重要的配置是：

* 硬件配置
* Linux发行版本
* 内核
* 编译器
* commit ID

上面的benchmark内部的相关性分析的思路相当于把指标作为自变量而与KPI的相关性作为因变量，现在，配置的分析相当于把一个完整的配置作为自变量，

根据配置模块存在的数量的不同，编译器版本只有两个，分别是gcc4.9和gcc5.0，内核数量也比较少，所以可以重点分析硬件配置和commit ID，而commit ID又是重中之重。不同benchmark、指标对于同一配置的测试结果数据作为因变量，同样根据Pearson相关系数判它们的相关性，这一步的分析结果可以作为配置降维的依据。

## 指标变化模式的分析

上文已经谈及，commit ID是所有的配置模块中最重要的一个，同时也有比较庞大的数据量（78个benchmark包含不重复的commit ID13000多个），指标随着commit ID变化的模式往往包含着许多有用的信息。

比如一次新的commit如果集中解决了I/O问题，那么它就能够带来关于I/O的指标的跳变，这也是其中最好检测的变化模式，同时与I/O有关系但不是直接相关的指标也许会出现线性变化。检测并匹配指标随着commit ID的变化模式能够协助指标相关性的分析和指标的内部关系。

不仅是lkp-tests性能的提升，如果能够了解commit与指标的关系，就能够从两次commit之间的改动分析出它所影响的模块，这里很有可能就是性能缺陷存在的点，对性能缺陷的检测来说很有参考价值。

这个过程需要先对commit ID进行拓扑排序，确定一个发行顺序，不然数据的变化很杂乱不会有任何意义。确定了commit ID的顺序，我们根据之前指标降维和相关性分析的结果，每一个指标都能够得到一个随着commit变化的向量，向量的变化模式是我们重点研究的对象。

首先需要对向量的变化进行分析，确定是什么模式。除了已经提出的跳变模式，我们还推断有线性变化模式和波动模式。三种变化模式的示意图如下所示：

图1：变化模式的示意图

# 实验过程



## 实验环境

表3：实验环境

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 设备 | Lenovo-G480 | | 4GB内存、2核2线程、2.5GHz | |
| core40服务器 | | Intel(R) Xeon(R) CPU E7-4850 2GHz | |
| 系统 | Ubuntu 15.10 | | Red Hat 4.8.3-9 | |
| 语言 | Python | Ruby | | R |
| 开发工具 | Sublime-text2 | G-edit | | R-studio |

## 指标降维过程

### 数据预处理

#### 数据提取

##### 建立索引表

根据实验设计，提取数据的第一步是建立结果文件的索引表，开始的时候我采用的是直接在result目录下使用find命令搜索所有的结果文件，但是搜索的结果有70M+，且所有的结果文件都是混在一起的。这是开始的时候的索引表建立的命令，使用find命令可以将指定的结果文件目录导入到一个文本文件中，命令格式如下：

|  |
| --- |
| find /result/benchmark/\*/\*/\*/\*/\*/\* –name matrix.json |

##### 提取过程的多线程优化

在实际操作中，我发现虽然上面得到的索引表可以直接使用，但是因为不同目录的文件在磁盘上不是连续存储的，所以读取效率降低，78个benchmark中完成其中的52个需要36个小时以上，提取70个则需要48小时以上，完全提取基本上要耗费60个小时，这期间的任何问题都可能会导致程序的崩溃，因此结果不完整只能重新开始。而且整体的提取还出现了提取出的csv文件和时间开销过大不能直接使用的问题。出于程序效率和鲁棒性的考虑，首先我把索引表建立命令的根目录更改到benchmark下，继上面的csv结果文件输出按照benchmark分开之后，建立索引表的过程也按照benchmark分开。

更新提取程序的过程中，本文采用Parallel Python框架对原来的串行Python程序进行了并行优化，考虑到78个benchmark和服务器的核心数是40个，所以我将整体程序分为40个线程，每一个对应两个benchmark，分配到40个核并行计算。经过测试，完成73个benchmark数据提取的时间缩短到了两个小时。

这其中的原因一部分是并行计算的优势，另一部分是由于独立的benchmark对应各自的csv文件，因此不需要处理两个benchmark之间不同指标数据整合的问题，这一问题得到了解决。

此时可以利用Python的threading模块将78个benchmark分配给服务器上的40个核进行计算，之前需要50个小时左右的工作能在两小时内基本完成。提取的结果格式如下：

表4：数据提取结果示例

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| benchmark | c1 | c2 | filesystem | kernel | compiler | commit ID | Update.boot |
| aim7 | 100%-10x-10s | lkp-ws02 | eywa-rootfs | x86\_64-rhel | gcc-4.9 | 6a13feb9c82803e2b815eca72fa7a9f5561d7861 | 179.89 |

限于版面，这里只展示出了一行，对应的是一次独立的实验，其中指标也只选择了其中一个。

#### 指标降维过程

按照上文的实验设计，指标降维选择了PCA降维算法。

PCA算法的第一个过程是确定主成分的个数，也就是前面所说的降维算法的一般步骤的第一步。确定主成分的个数可以使用R语言的碎石图功能，如下图所示：

图中主成分的个数在30之后趋于平缓，所以我们可以认为主成分个数在30个左右的时候比较合适。

一旦确定了主成分的个数，降维的过程并不复杂，只需要计算csv表格中前7列之后的内容就可以了。我在30个主成分左右分别设置了几个主成分个数，得到的方差保留率如下图所示：

图2：方差保留率和主成分个数的关系

从图中可以看出，对于aim7而言，当主成分个数设置为33个的时候方差的保留率就已经达到了90%，而当要求的方差保留率再次升高5%时，主成分的个数明显比上一个5%要求的个数要多。主成分的个数是很消耗计算量的，所以在此我们基本可以认为这33个主成分中提取出的指标可以很大程度上反映aim7整体的benchmark的测试量度。

最后给出的结果如下（aim7的总共指标数目有15681个，方便展示，这里在设定的时候保留了5个主成分）：

表5：PCA结果示例

|  |
| --- |
| Principal Component Analysis  Call principal(r = Harman23.cor$cov, nfactors = 5, rotate = "carimax")  Standardizes loadings(pattern matrix) base upon correlation matrix  RC1 RC2 RC3 RC4 RC5  SS loadings 3.52 2.92 4.12 3.05 3.72  Proportion Var 0.24 0.17 0.11 0.08 0.07  Cumulative Explained 0.24 0.41 0.52 0.60 0.67 |

SS loadings包含了主成分相关联的特征值，指的是与特定主成分相关联的标准化之后的方差。

Proportion Var表示的是每个主成分对整个数据集的解释程度。

上面的结果显示，5个主成分可以解释67%的数据方差，实际上，根据我们前面实验设计部分设置的三个阈值，我们得到了方差保留率和主成分个数的关系图：

R语言的主成分分析同时给出了这33个主成分的构成方程式，我们从中找到了与每个主成分关联度最大的33个指标如下（按照主成分顺序排列）：

表5：33个主成分的代表指标

|  |
| --- |
| aim7.time.page\_size  kmsg.ACPI\_BIOS\_Warning.bug.....X\_length\_mismatch\_in\_FADT.Pm1aControlBlock.....tbfadt...  kmsg.ERST.Can\_not\_request.mem....for\_ERST  aim7.time.involuntary\_context\_switches  time.page\_size  time.elapsed\_time  time.voluntary\_context\_switches  aim7.real  time.involuntary\_context\_switches  kmsg.ie6xx\_wdt\_ie6xx\_wdt...Watchdog\_Timer\_is\_Locked.Reg...  aim7.time.elapsed\_time  kmsg.ACPI\_BIOS\_Warning.bug..Optional\_FADT\_field\_Pm2ControlBlock\_has\_zero\_address\_or\_length..x00000000000009F4...tbfadt...  kmsg.Error.Driver.pcspkr.is\_already\_registered.aborting  time.maximum\_resident\_set\_size  aim7.time.percent\_of\_cpu\_this\_job\_got  time.user\_time  time.system\_time  aim7.jti  time.elapsed\_time.max  kmsg.Firmware\_Warn..GHES.Poll\_interval\_is.for\_generic\_hardware\_error\_source...disabled  aim7.jobs.per.min.per.task  aim7.time.elapsed\_time.max  kmsg.ACPI\_BIOS\_Warning.bug..Invalid\_length\_for\_FADT.Pm2ControlBlock...using\_default....tbfadt...  time.percent\_of\_cpu\_this\_job\_got  aim7.time.user\_time  aim7.time.maximum\_resident\_set\_size  aim7.cpu  aim7.jobs.per.min  kmsg.ACPI\_BIOS\_Warning.bug..Invalid\_length\_for\_FADT.Pm1aControlBlock...using\_default....tbfadt...  aim7.time.voluntary\_context\_switches  aim7.time.minor\_page\_faults  aim7.time.system\_time  time.minor\_page\_faults |

我们来看上面提取出的33个指标之间的相关性，观察的同时可以协助解释主成分本身的意义，请看主成分与具体指标的相关性分析，这里仅放一个PC1与众指标的相关性作为示例：

表6：一些指标和主成分的相关性示例

|  |
| --- |
| Standardized loadings (pattern matrix) based upon correlation matrix  aim7.time.page\_size 0.36  kmsg.ACPI\_BIOS\_Warning.bug.....X\_length\_mismatch\_in\_FADT.Pm1aControlBlock.....tbfadt... 0.03  kmsg.ERST.Can\_not\_request.mem....for\_ERST 0.03  aim7.time.involuntary\_context\_switches 0.32  time.page\_size 0.26  time.elapsed\_time 0.80  time.voluntary\_context\_switches 0.08  aim7.real 0.86  time.involuntary\_context\_switches 0.32  kmsg.ie6xx\_wdt\_ie6xx\_wdt...Watchdog\_Timer\_is\_Locked.Reg... 0.03  aim7.time.elapsed\_time 0.86  kmsg.ACPI\_BIOS\_Warning.bug..Optional\_FADT\_field\_Pm2ControlBlock\_has\_zero\_address\_or\_length..x00000000000009F4...tbfadt... 0.03  kmsg.Error.Driver.pcspkr.is\_already\_registered.aborting -0.11  time.maximum\_resident\_set\_size 0.08  aim7.time.percent\_of\_cpu\_this\_job\_got 0.31  time.user\_time 0.01  time.system\_time 0.84  aim7.jti 0.37  time.elapsed\_time.max 0.80  kmsg.Firmware\_Warn..GHES.Poll\_interval\_is.for\_generic\_hardware\_error\_source...disabled 0.03  aim7.jobs.per.min.per.task -0.14  aim7.time.elapsed\_time.max 0.86  kmsg.ACPI\_BIOS\_Warning.bug..Invalid\_length\_for\_FADT.Pm2ControlBlock...using\_default....tbfadt... 0.03  time.percent\_of\_cpu\_this\_job\_got 0.31  aim7.time.user\_time 0.02  aim7.time.maximum\_resident\_set\_size 0.20  aim7.cpu 0.81  aim7.jobs.per.min -0.15  kmsg.ACPI\_BIOS\_Warning.bug..Invalid\_length\_for\_FADT.Pm1aControlBlock...using\_default....tbfadt... -0.07  aim7.time.voluntary\_context\_switches 0.08  aim7.time.minor\_page\_faults 0.07  aim7.time.system\_time 0.84  time.minor\_page\_faults 0.06 |

从上面的结果中可以看出，aim7.time.elapsed\_time和aim7.time.elapsed\_time.max与PC1的相关性都是最大的，都达到了86%，在一定程度上可以代表PC1，同时也说明了这两者之间的相关性也很大。从字面意思上来看两者都是反映了测试度过的时间，只不过后者记录的是最大时间值。而PC3则与aim7.jobs.per.min和aim7.jobs.per.min.per.task两个指标的相关性最大，其中aim7.jobs.per.min还是aim7的KPI，所以aim7主要反映的是系统的吞吐率，从字面意义上理解，是通过考察系统一分钟能够接受的job数目也即是接受的最大负载来判断的。

#### 降维总结

上面的降维过程把源数据中指标数目降低了两到三个数量级，以aim7为例，将15681个指标降为33个指标，降维之后的指标能在一定程度上反应出整个benchmark的测试亮度。而且，降维过程对后面的指标相关性分析也有一定的参考意义。



## 指标和配置的相关性分析

### 单个benchmark的指标相关性分析

单个benchmark的分析在第二章中已经有详细的设计，实验结果以78个csv表格的形式展现，每一个表格是一个benchmark的指标相关性数据，下面以ebizzy为例详细分析一下结果数据及其意义。

Benchmark内部的指标相关性分析的一般步骤是：

* 找到衡量标准指标（一般选定KPI）
* 分别衡量与KPI之间的数据重叠程度（决定了分析结果是否有意义）

对应不同的配置，有些指标可能没有测试数据，而另外一个指标有测试数据，这里这种现象称为数据不重合或不重叠，不重叠的数据过多导致整个csv文件较为稀疏，相关性测试的意义不大。

* 不影响整体的分析情况下去除空缺数据

空缺数据是指对整体矩阵的稀疏性影响较大的指标对应的数据，比如五个指标中，四个都有某维度（对应配置）的值，第五个没有该维度的值，这样使整个矩阵增加一个空行。这类数据的存在对相关性分析的结果准确性有很大的影响。

* 衡量相关性

#### 相关性标准的选定和数据重叠程度的衡量

这里以ebizzy为例，根据前面的分析，我们使用的是pearson相关系数衡量。衡量标准我们先假定是ebizzy的KPI——ebizzy.throughput。经过KPI数据和其他所有指标的数据重合程度衡量，在ebizzy的所有5238个指标中，90%以上与KPI的数据重合率在70%左右，也就是说ebizzy.csv是一个相对不太稀疏的矩阵，衡量其指标的相关性是有意义的。

#### 有选择地去除重叠数据

之后本文对所有的5238个指标进行一次搜索，将其中与ebizzy的测试重合率不满30%的指标去除，这些指标不包含在本次的相关性测试中，所以最终留下的指标个数是5187个。

#### 相关性计算

使用Pearson相关系数衡量各个指标和KPI之间的相关性，结果分析如下。

至于相关性的效果，我们不妨从几个准KPI与KPI本身的相关性入手分析，结果如下（以前五个为例）：

表7：ebizzy的指标相关性分析结果示例

|  |  |
| --- | --- |
| ebizzy.time.involuntary\_context\_switches | 0.656361592 |
| ebizzy.time.maximum\_resident\_set\_size | 0.618942495 |
| ebizzy.time.minor\_page\_faults | 0.992006463 |
| ebizzy.throughput | 1.000754148 |
| ebizzy.time.voluntary\_context\_switches | 0.579119672 |

从一定程度上来看，准KPI与KPI之间的相关性基本上都在一个档次上，比一般的指标的相关性要大的多，其中KPI的意思是系统的吞吐量，ebizzy.time.minor\_page\_faults指的是次要页面访问错误，与系统I/O都有很大关系，从而，我们可以认为ebizzy在系统I/O测试上是比较侧重的。

在观察相关性分析结果的时候，有一个有意思的现象，ebizzy.throughput作为KPI，与它字面上相关的ebizzy.throughput.max和ebizzy.throughput.min与它的相关性都很大，在0.85以上，这说明，ebizzy.throughput的值大部分都是持平的，变化比较平缓，所以最大最小值与平均值基本上都差不多，而在第一步的降维中，ebizzy.throughput.max和ebizzy.throughput.min和KPI——ebizzy.throughput都在同一个主成分中，这从侧面验证了我们分析结果的正确性。

#### 相关性分析的总结

上面的相关性分析以ebizzy为例给出了结果，并且分析了几个关键的指标与KPI的相关性和实际意义。

### 不同benchmark之间配置的相关性分析

与单个benchmark指标相关性的分析类似，这里把一个完整的测试配置作为相关性测试的基本单位。我们定义的配置包含以下几个方面：

* 硬件配置（内存设备等）
* Linux发行版本
* 编译器
* 内核版本
* commit ID

同样也需要经过以下几个主要的分析流程：

* 确定一个对比的标准
* 衡量与标准配置的数据重叠程度
* 在不影响整体的情况下去除空数据
* 分析相关性

不同于同一benchmark下的指标相关性分析，因为没有一个明确的对比标准，所以这里我们将采用所有的配置进行两两比对，所以数据量和计算量都比较大。索性我们在衡量数据重叠时候选择性放弃了一些重叠度小的数据，所以不是严格的两两计算，这减小了不少的计算量。

第三步采用和上文一样的方法，去除了数据重叠度少于30%的配置，所以此相关性分析也是不完全的。在进行这一步的时候我们发现，由于配置的复杂度比较高（是一个六维的向量），所以相同的配置要求比较严格，测试数据比较少。在920000多条测试数据（本文研究的所有数据）中，有11794个不用的配置，也就是说平均一个配置只有60~80条测试数据。这个数据经过数据重叠的评价之后很难再有分析的价值，因为重叠的数据量更少，大多是个位数甚至是0。

因此我们更改思路，分别分析不同的单个配置的相关性。比如分析不同的内核版本的相关性、编译器的相关性等。

下面的表格列出了实验的大致结果（其中的衡量标准是使用主成分分析得出与其中最主要的主成分相关性最大的配置）：

表8：不同benchmark的配置相关性分析结果的分析

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 硬件配置 | | Linux发行版 | 内核 | 编译器 | commit ID | |
| 衡量的标准 | 100%-10x-10s和lkp-ws02 | | debian-x86\_64-2015-02-07.cgz | x86\_64-rhel | gcc-4.9 | 6a13feb9c82803e2b815eca72fa7a9f5561d7861 | |
| 结果（仅展示5个） | 配置 | 相关性 | None | None | None | 配置 | 相关性 |
| 1000-sync\_disk\_rw和vm-lkp-a05 | 0.62 | 1f93e4a96c9109378204c147b3eec0d0e8100fde | 0.92 |
| 10000-jmp\_test和 lkp-a05 | 0.47 | 2a1ed24ce94036d00a7c5d5e99a77a80f0aa556a | 0.87 |
| 1BRD\_48G-btrfs-10-sync\_disk\_rw和ivb44 | 0.20 | 2c6625cd545bdd66acff14f3394865d43920a5c7 | 0.67 |
| 30-performance-1-16G-ext4-500-disk\_wrt和lkp-hsx03 | 0.13 | 31ade3b83e1821da5fbb2f11b5b3d4ab2ec39db8 | 0.14 |
| 400-add\_double和lkp-a04 | 0.08 | 3959df1dfb9538498ec3372a2d390bc7fbdbfac2 | 0.07 |
| 分析 | 这里同样使用了Pearson相关性系数进行评价，这里给出的前两位的配置在第一个参数上都是一样的，仅仅是能够容纳线程数不同，因此想干度较高，另外的几个使用的配置相差很大，所以相关性也很大 | | 本文数据使用的绝大多数linux都是是debian-x86\_64，所以这里很难分析其与其他发行版的相关性，因为缺少重叠数据 | 其他的内核与x86\_64-rhel重合度很低，所以本文使用的lkp-tests数据主要是使用x86\_64-rhel测试的 | 编译器仅有gcc4.9和gcc5.0两种，其中gcc5.0测试数据量少于gcc4.9的0.1倍，所以这里的数据测试是以gcc4.9为主的。 | 以上的几个示例数据是经过挑选的，前两个都是同一个开发树上前后相隔仅一代的节点，所以相关度很高，这说明，这一次更新改动比较小。中间一个是同一个开发分支上经过多代开发的，所以相关性还有很大，但是已经比较近的小了很多。最下面的两个来自不同的开发分支，而且隔得commit次数比较多，所以相关性很差，表明不同的开发分支之间的相关性已经很小了。 | |

## 指标化模式的分析

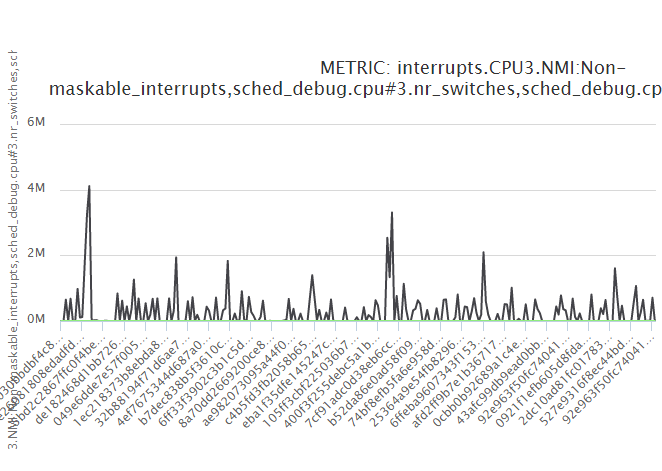
目前可以搜索出锯齿状跳变的指标，但是其他的两种模式还没有搜索还不太理想。下面是搜索的其中一个具有锯齿状跳变模式的指标图形（指标图形可以访问<http://192.168.0.119/lkpData>观察）。

图3：锯齿状跳变模式检测结果示例

# 结论



## 工作总结

本文基于lkp-tests的结果进行了一些分析工作，主要在四个方面：

* 指标的降维
* 同一benchmark内部的不同指标的相关性分析
* 不同benchmark的配置相关性分析
* 指标变化模式的分析

其中1和3对于lkp-tests的降维有很大的参考意义，这意味着可以在尽量保留测试效果的情况下减少测试的次数，对于整个lkp-tests的框架改善很有帮助。2可以昂住理解指标的意义和benchmark的测试意义，而4则对linux的开发过程中性能问题的检测提供了一定的参考，比如当检测出阶梯状跳变的时候可以根据上一次的代码改动去寻找性能缺陷的位置。

## 目前的问题与未来的工作

指标变化模式的分析还可以更加详尽，这对于性能缺陷的检测意义重大，这个思路与之前的性能缺陷的检测有一定的相似之处，但是有他的独特创新点、因为我们不是盲目去跟踪每一个指标的变化，我们只需要跟踪出现阶梯状跳变的指标即可，而且因为我们知道这一次的突变发生的位置，所以会更快并更加精准地完成性能缺陷的检测。

# 插图索引

图1 变化模式的示意图 8

图2 方差保留率和主成分个数的关系 17

图3 发送描述符的转发举例 18

# 表格索引

表1：Pearson相关系数和Spearman相关系数的对比

表2：一些基本的概念

表3：实验环境

表4：数据提取结果展示

表5：33个主成分的代表指标

表6：一些指标和主成分的相关性示例

表7：ebizzy的指标相关性分析结果示例

表8：不同benchmark的配置相关性分析结果的分析

# 参考文献

1. Adrian Nistor1, Linhai Song2, Darko Marinov1 and Shan Lu. ***Toddler: Detecting Performance Problems via Similar Memory-Access Patterns.***] In ICSE, 2013.
2. Yepang Liu, Chang Xu and Shingchi Cheung. ***Characterizing and Detecting Performance Bugs for Smartphone Applications.*** In ICSE, 2014.
3. Michael.J.Fischer, Martin Pinzger, Harald Gall. ***Populating a Release History Database from version control and bug tracking systems.*** In ICSM, 2003.
4. Nachiappan Nagappan, Thomas Ball and Andreas Zeller. ***Mining Metrics to Predict Component Failures.*** In ICSE, 2006.
5. T.Zimmermann, Rahul Premraj and Andreas Zeller. ***Predicting Defects for Eclipse.*** In MoDELS, 2007.
6. Sunghun Kim, Thomas Zimmermann, E.James Whitehead and Andreas Zeller. ***Predicting Faults from Cached History.*** In ICSE, 2007.
7. Sunghun Kim, Thomas Zimmermann, E.James Whitehead and Andreas Zeller. ***Predicting Faults from Cached History.*** In ICSE, 2007.
8. Patrice Godefroid, Nils Klarlund and Koushik Sen. ***DART: directed automated random testing.*** In pldi, 2005.
9. Cristian Cadar, Daniel Dunbar and Dawson R Engler. ***KLEE: unassisted and automatic generation of high-coverage tests for complex systems programs.*** In OSDI, 2008.

9. Dawson R Engler, David Yu Chen, Seth Hallem, Andy Chou and Benjamin Chelf. \_\*\*[Bugs as deviant behavior: a general approach to inferring errors in systems code.](http://research.cs.queensu.ca/~ahmed/home/teaching/CISC880/F10/papers/BugsAsDeviantBehavior\_SOSP2001.pdf)\*\*\_ In sosp, 2001.

10. Cristian Cadar and Koushik Sen. \_\*\*[Symbolic execution for software testing: three decades later.](http://www.eecs.berkeley.edu/~raluca/cs261-f15/readings/symb.pdf)\*\*\_ In Communications of the ACM, 2013.

11. Adrian Nistor, Tian Jiang and Lin Tan. \_\*\*[Discovering, reporting, and fixing performance bugs.](http://mir.cs.illinois.edu/~nistor1/pubs/msr13.pdf)\*\*\_ In MSR, 2013.

12. Christian Bird, Alex Gourley, Prem Devanbu, Michael Gertz and Anand Swaminathan. \_\*\*[Mining email social networks.](http://research.microsoft.com/pubs/138221/bird2006mes.pdf)\*\*\_ In MSR, 2006.

13. Luis Lopezfernandez, Gregorio Robles, Jesus M Gonzalezbarahona, U Rey and Juan Carlos. \_\*\*[Applying Social Network Analysis to the Information in CVS Repositories.](http://gsyc.es/~jgb/libresofteng/sna-repositories-2004/sna-repositories-2004.pdf)\*\*\_ In MSR, 2004.

14. Jaime Spacco, David Hovemeyer and William Pugh. \_\*\*[Tracking defect warnings across versions.](http://www.irisa.fr/lande/lande/icse-proceedings/msr/p133.pdf)\*\*\_ In MSR, 2006.

15. Abram Hindle, Daniel M German and Ric Holt. \_\*\*[What do large commits tell us?: a taxonomical study of large commits.](http://turingmachine.org/~dmg/papers//dmg2008\_msr\_largeCommits.pdf)\*\*\_ In MSR, 2008.

16. Daniel M German. \_\*\*[Mining CVS repositories, the softChange experience.](http://2004.msrconf.org/papers/German.pdf)\*\*\_ In MSR, 2004.

17. Sunghun Kim, E J Whitehead and Yi Zhang. \_\*\*[Classifying Software Changes: Clean or Buggy?.](https://users.soe.ucsc.edu/~ejw/papers/cc.pdf)\*\*\_ In IEEE, 2008.

18. S.M.A. Zaman, Bram Adams and Ahmed E.Hassan. \_\*\*[A qualitative study on performance bugs.](http://sail.cs.queensu.ca/Downloads/MSR2012\_AQualitativeStudyOnPerformanceBugs.pdf)\*\*\_ IN MSR, 2012.

19. Godfrey and Qiang Tu. \_\*\*[Evolution in open source software: a case study.](http://plg.uwaterloo.ca/~migod/papers/2000/icsm00.pdf)\*\*\_ In ICSM, 2000.

20. Kunrong Chen and Vaclav Rajlich. \_\*\*[Case study of feature location using dependence graph.](http://www.cs.wayne.edu/~vip/publications/Chen.IWPC.2000.FeatureLocation.pdf)\*\*\_ In ICPC, 2000.

21. Thomas Eiter and Heikki Mannila. \_\*\*[Computing Discrete Fr´echet Distance](http://www.kr.tuwien.ac.at/staff/eiter/et-archive/cdtr9464.pdf)\*\*\_ In CD-TR, 1994.

# 致谢

本文中所有的研究工作都是在我的导师陈康老师、陈渝老师以及向勇老师、Intel的黄瀛工程师的指导和帮助下完成的，期间肖络元工程师、茅俊杰学长也给了我很大的帮助。感谢各位老师、学长和工程师们的无私帮助，没有他们的帮助，也不会有这篇文章。我尤其想感谢陈渝老师，在我的研究工作遇到困难时他总是对我很耐心，对我生活上的事情也表示理解，我因为学校的社会工作常常会耽误一些时间，陈老师从未因此批评过我，谢谢您！

# 声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签 名：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

# 附录A 外文资料的书面翻译

**一、伤检分流的影响，Mozilla和gnome的研究**

#题目

Impact of Triage: a Study of Mozilla and Gnome

#问题

许多大型的软件项目（文中以Mozilla和Gnome为例）都有大量的用户可以报告项目中发现的问题，但是仅仅有少部分的开发人员发现的问题可以被解决，然而不具有开发能力的人的报告就被忽略掉了，这其实是一种很大的浪费，而且不能保证该项目能够很好的运营，也不能进行针对性的开发

#解决方法

文中提出了Triage（分流，某些工业流程下又被称为伤检分类，指的是非开发人员针对项目出现的问题提出的报告，一般没有得到重视不能很好地解决），是检测目前很少被关注的Triage信息来为项目开发提供参考方向。

文中论述了该方法，并使用它进行了一些检验，在最后分析了它的适用范围和局限性以及相关研究，下面分四部分——方法概述、检验结果、适用范围和局限、相关研究内容分别阐述

##方法概述

该过程使用了十年的Gnome和Mozilla的数据——Bugzilla系统，使用该方法遵循以下的步骤：

1、获取原始数据

2、初步清洗加工

3、创建指标并应用到数据集中

4、分析指标验证结果

方法概述的过程如下所示：

1、确定数据来源并介绍Bug Triage Protocol（gnome和mozilla目前遵循的），指出triage activity的概念是从unconfirmed事件状态转换为new或者是confirm

2、数据的清洗和准备，首先采用了Gnome和Mozilla2011年3月的数据，并且出于日志质量的考虑过滤掉了2000多条，然后定义triage事件为事件属性的改变或事件状态的确认（从unconfirmed变为new或confirmed）

3、角色的确定

给出了triager和developer的明确定义，developer是在bugzilla上面提交过代码的开发人员，而triager指的是针对别人提出的triage issue进行过一次triage activity，另外两者的角色可以变化，我们认为一个triager在其第一次提交代码之前都是triager，提交之后是developer。最后还有一种只解决自己提出的triage issue的，成为reporter

4、分流的正确性，目前关于分流行为是否正确没有黄金法则，在下一个用户遇到这个issue之前我们也不知道它是否发生了错误，所以我们认为如果修改的属性值跟最后的属性值相同的是正确的，否则是错误的。

##检验结果

这一部分分两块，第一部分介绍了我们从Gnome和Mozilla的triage activities中的发现以及两个项目之间的不同之处的分析，第二部分对triage activities的影响进行了量化

1、在给出Gnome和Mozilla的triage activities之前，我们需要先看一下他们定义的triage activities都是什么。这里给出了triage activity的三个任务分别是过滤、补全和分配给各产品。

之后的实验结果发现，Gnome的Product, OS, Priority， Version和Severity类的triage活动较多，Mozilla的Priority活动很少。分析原因，一是因为Mozilla用户数量多，拥有计算机专业知识的人相对少，报告的错误有时候是不准确的，所以各种活动都很多。第二，Mozilla限制了triager对优先级的改变，所以Priority活动很少。这说明我们的实验数据跟实际是相符合的。

2、实验结果表明，对triger们的活动造成最大影响的是不相关报告的过滤，Mozilla过滤了77%，Gnome过滤了27%，且过滤的正确率达到99%。另外由于补全造成的issue是第二个最大的因素。因此我们预期从这两点入手，通过有效的过滤和补全报告信息来减轻开发者的负担。

##局限性分析

由于原因可能会在评测中造成局限：

1、用户角色的改变：

上面提到过，一个triager可能会变成developer，reporter也会变成triager，这对我们的评测造成一定的影响。

2、产品名字的改变，如果一个triager报告的issue的产品变了名字，可能会导致识别的错误，我们不得不维护一个表查看以前的名字。

3、有些issue比如NOTABUG，不会被认为是bug，也不会有确认信息，所以我们最后统计的时候会漏掉这一部分信息，这是不全面的地方

##相关研究

本文主要旨在理解和量化triagers的行为，另外还有以下相关的研究正在进行：

1、将问题报告精确分配给开发者

2、重复报告检测

3、bug修复的记录

##总结

本文从两个实例分析了非开发者的行为对整个项目的改进有很大的作用，但是我们现在缺少足够精确的量化手段，希望使用这些实验结果可以做一个工具帮助triage信息改善项目开发过程

**二、理解并检测现实世界中的性能缺陷**

#Understanding and Detecting Real-World Performance Bugs

##Introduction

###Motivation

介绍了研究性能问题(Performance Bugs)的必要性

####定义

文章中认为更改少量代码可以引起相当可观的速度提升的缺陷为性能问题

####存在广泛、不可避免而且造成的影响很大

囿于随机黑盒测试的软件测试现状，现在还没有能有效检测出性能问题的手段；

性能问题会降低吞吐量、增加延迟、浪费资源，可能会导致大型软件项目的整个失败；

又由于性能问题不会导致直接的系统崩溃，检测困难。

####软件开发的趋势会增加性能问题的关键性

硬件：摩尔定律保证了没有软件进展的时候，软件效率也会因为硬件的发展而加速，因此多核时代的单核效率低下造成的打击是毁灭性的

软件：软件系统正趋向于更加复杂，负载变化很快，性能浪费会更容易出现，检测起来会更难

能源效率：在资源有限的时代里，能源的重要性不言而喻，而一个性能问题造成的能源浪费是相当可观的，因此解决性能问题就显得更加重要

###（本文章的）贡献一：特性研究

目前针对许多传统bug（例如功能性bug）的实例研究已经很多，而且相当成熟，这些研究成功地指导了软件功能测试、功能性bug的检测和错误诊断。而对性能bug的理解很少且有错误的看法，本文的研究有以下几个方面的意义：

####指导bug的避免

本文研究中三分之二的bug产生都是因为对软件性能特征的工作量或者API的错误理解造成的；

四分之一以上的bug都是从修改之前因为工作量和API更改的代码中产生的；

避免这些bug，开发者需要注重性能的注释系统和软件改动造成的影响的分析。

####指导性能测试

本文中近一半bug的检测都需要既包含特殊feature又包含大尺度数据的输入才能被观测到；

集合功能性测试的生成输入技术和注重大尺度输入的技术将会显著性地提高现有技术的状态

####指导bug的检测

本文中检测的几乎一半的错误补丁中都包含有可以在性能bug检测和修复中复用的效率改善规则

####与功能性bug的对比

性能缺陷比起功能性缺陷隐藏的时间通常会更加长，但是不能把性能缺陷简单归类为小概率事件，因为其中很大一部分性能缺陷可以由几乎所有的输入引起。

####普遍的动机

很多性能缺陷都可以通过很少都的代码行数和工作量改善，且会大幅度改善整个软件的运行效率

很大部分的性能缺陷存在于多线程程序中，开发者需要一个工具来避免落入过渡的多线程设计陷阱

###贡献二：缺陷的检测

在此我们提出三个假设：

- 存在效率相关的规则

- 我们可以从众多的性能缺陷的补丁中抽象出这种规则

- 我们可以使用这种规则来检测未知的性能缺陷

为了检测这些假设是否正确，我们从25个Apache、Mozilla、MySQL的性能缺陷补丁中建立检测程序，用其检测其他的潜在的缺陷，三个软件中共检测出332个新的潜在性能缺陷，其中的219个是从不同于本身的软件中数据构建测检测程序中检测出的。

从这些数据中我们可以断定：以上三个假设是存在一定的现实意义的。

##方法论

###研究对象的选择

我们选择了五个成熟的大型开源软件（Apache、Chrome、GCC、Mozilla、MySQL）来作为我们的研究对象，这五个软件的共同特点是都是大型且成熟的开源软件而且拥有大量的代码以及维护很好的bug数据库，五个软件覆盖了各种语言、各种用途以达到研究的一般性

###bug的获取

GCC、Mozilla和MySQL三个软件对性能缺陷都有特殊的标记，使得我们能够很容易地从其bug database中获取性能缺陷，而Apache和Chrome没有这样的专门标签，我们从他们的报告文档中通过搜索性能相关的关键词来检测。

###注意事项（本文研究的局限性）

- 我们选择了五个很具有代表性的开源软件，也覆盖了很大一部分分类，但是不能覆盖全部的分类（事实上也是做不到的）

- 我们研究的bug都是五个软件的bug database中取出来的，没有任何的主观臆断，但是有的性能缺陷是永远不会被检测出或者修复的，对于这种性能缺陷，我们是无能为力的，但是我们认为我们选取的这些都是极具代表性的bug，一定程度上代表了那些不能检测的bug

- 文中所有的bug检测、分析、分类都是历时长久而且使用了大量的人力，使其更加可信

##案例分析

我们研究的目标是通过避免、暴露、检测、修复性能缺陷来该部分使用了四个经典的案例来证明我们的研究的可信性和潜力，并且回答以下几个问题：

1. 性能缺陷的是否会因为跟传统的bug区别过大导致其不能根据传统bug的检测程序来研究

2. 如果没有那么不同，那么会不会它们之间太相近了，根本不需要一个额外的研究？

3. 如果开发者更加ixin，我们是否还会需要相关研究或者工具来支持我们的工作（针对性能缺陷）

**三、两个开源软件的研究：Apache和Mozilla**

#题目

Two Case Studies of Open Source Software Development: Apache and Mozilla

#简介及问题

本文设计了一种方法论研究了apache和Mozilla的开发特点，首先从apache的研究中使用该方法，从其特点中总结出七个假设，然后用同样的方法论研究Mozilla的开发过程，并且验证假设。

提出了开源软件开发模式的优点在于快速、廉价而且有可能做的更好，提出了与传统开发模式相比几个常见的弊端

- 开发人员规模比较大

- 工作选择自由度大

- 没有严格的系统级设计

- 没有项目规划时间表等

这些问题的出现可能是由于开发人员规模大且很少经常有面对面的交流，主要是通过电子邮件和工作板的形式交流，很多传统的协调工作的方式都没有被采用。但是开源开发的先天性优势决定了他的成功，现在已经是不可忽略的一股力量，下面主要分析apache和mozilla的开发过程。

开源软件的开发模式特点和面临的问题与挑战，具体问题如下：

- apache的开发是怎样的一个过程

- 分别有多少人参与了代码编写、问题报告、修复漏洞的工作

- 人们在参与的过程中是否会变换角色，还是一直担任同一角色？所有人的工作量都是差不多的吗？

- 代码贡献者在哪一部分工作？是严格的一个文件还是模块水平？

- apache的缺陷密度是怎样的水平？

- 解决问题需要的时间是多长？高优先级的问题是否会解决的更快？解决问题的时间间隔会随时间而减少吗？

#方法论及数据源

备注：该总结中涉及的数据都在论文的表格或者图中，没有给出位置，仅做了一定的总结

开源软件开发过程很少有面对面交流和电话沟通，所以绝大多数的开发信息被记录在电子档案（邮件等电子资料）中，我们量化的数据来源就是这些

- apache的记录有邮件（记录了发件人、地址、主题、内容等等必要信息，下同）、BUGDB（bug数据库）、problem reports、CVS上的代码改动细节

- Mozilla数据源主要来自CVS和Bugzilla

从这些数据中抽象出一系列的指标来进行评价整个开发过程，其中对于一个problem report我们只考虑三个状态：CREATE、RESOLVED、VERIFIED

对商业项目提出了两个系统：记录更改历史的扩展的变更管理系统（ECMS）以及追踪源代码变化的源代码控制系统（SCCS）。

为了方便问题的研究，论文选用了五个与apache同时期的商业项目

#问题的研究与解答

这一部分逐条解答了简介中提出的各个问题

##apache的研究

- apache的开发是怎样的一个过程

apache的开发开始时是对一个http程序NCSA做修补工作的，几个月之后，已经相当完善的apache逐步去带了之前的服务器，这是apache的第一个版本1.0。因为开始的目标就是修复问题，所以没有任何传统开发的规则，开发人员也是volunteer。交流基本通过email。

1、角色和职责

所有的开发者都是志愿，都有一个主业，所以没有很多时间投入开发，整个团队最大的问题是没有严格的决策体系，都是靠投票表决。核心团队的规模一直不大，开始是8人，现在达到15人。每个开发人员都可以提交代码，重大的改动（会影响到其他开发者）通过投票决定。

核心开发者拥有查看问题并分配任务的权利，同时也担任开发测试职责。

2、确定工作内容（该修复哪些问题）

为了确保工作完成度，apache有两个主要的报告途径，一个是开发者mailing list，另一个是BUGDB，如果是BUGDB，报告者可能同时也是开发人员，报告时会自己附上解决的方法，另外一种情况，会将问题报告附加到开发者邮件列表中，如果开发者对该问题的评估觉得它足够严重将由核心人员分配问题解决任务。

3、工作分配和实施

确认了问题的严重性之后，核心团队会根据开发者擅长的领域分配任务

分配任务之后开始着手寻找解决方法，如果已经有几个选择，那么这些选项会跟其他的开发团队讨论

4、预发布测试

解决方法一旦确定并且实施后，新的版本会有测试者在自己的服务器上进行测试，类似于单元测试的过程

5、检查

单元测试结束后，核心开发者可以直接发布到CVS或者是再通过邮件与其他人员交流。确认之后所有的这些最终检查人员都有权利发布新的版本

6、管理发布版本

产品发布之后会有一个核心人员担任产品负责，可以评估产品出现的问题、解决时间直到产品到达一个稳定状态

以上对Apache开发做了综述，以下几个问题是结果量化的部分

- 分别有多少人参与了代码编写、问题报告、修复漏洞的工作

apache的开发团队非常庞大，平均每一个小的产品有400以上的开发者。

有182人贡献了695条问题报告，另有249人贡献了6092条代码提交行为

共有3060人提交了3975个问题，其中458人提交的591个问题得到了apache的最终代码上和文档上的改变

另外还有2654提交的3384条报告因为不能追踪而没有得到解决。

- 人们在参与的过程中是否会变换角色，还是一直担任同一角色？所有人的工作量都是差不多的吗？

从代码库的累计贡献来看，15个人贡献了超过83%的MRs和deltas，以及超过88%的代码增量和91%的代码删减量，核心开发人员正是15个人，这与之前的分析契合。可以看出，核心人员的贡献量占绝大部分。

如果仅看问题修复的情况，前15人仅贡献了66%的问题修复，修复参与率是26%，代码贡献率是4%，比问题修复要低六倍。

以1998年一月份为分割点，之前和之后分别有一次以上fix的开发人员有49人，分别有两次以上的是20人，第一时间段贡献至少一次代码提交的人有140，第二阶段有120人，其中只有25人是两个阶段都有代码提交的。这说明除了核心团队以外，只有少数人对工程产生了改变

对比其他五个同时期的商业项目（来自电信行业），其中两个前15人所做的delta改变是77%（apache的83%），code改变是68%（apache是88%）.部分的小项目甚至更低，达到了46%的delta和33%的代码改变。如果定义贡献了83%的MRs和88%的代码增加量为top developer的话，apache的top developer值远低于其他的商业项目。

- 谁在做problem report？

BUGDB上共有3975个不同的pr，前15人仅提供了5%的PRs，2600个开发者仅贡献了一个pr，306人贡献了2个，85人提交了3个，同一个问题被最多人报告涉及32人。前15人的开发团队中仅有3人在top 15问题贡献者中。从中我们可以看出，问题的贡献者比代码开发者分布得更加广泛，且分配的更均匀。

- 代码贡献者在哪一部分工作？是严格的一个文件还是模块水平？

我们预期是15个核心人员对代码的贡献量占绝大部分，其他人只贡献少量，不过从结果来看，开发者按需要可能贡献各个模块的代码，也即是说他们之间有充分的信任，代码归属的概念比较模糊

- apache的缺陷密度是怎样的水平？

回答这个问题我们需要先确定量化的标准，现在常用的衡量缺陷密度的标准是每千行代码的出错率，这个指标具有一些先天的缺陷：1、编程语言会造成比较大的影响2、整体的代码计算可能对局部测量产生影响3、没有考虑检测的覆盖面。鉴于这些缺陷，文章采用的量化方法是每千行交付代码的代码增量和delta量，很好地解决了以上的问题。apache与其他的商业项目比较结果如下（仅考虑了造成代码改变的缺陷）：

apache的最终发布版本缺陷密度比起其他的商业项目要大，但是其系统测试前的缺陷率却很低，说明这一差异是开源项目缺少系统测试导致的，其本身的开发过程能够有更小的缺陷密度

- 解决问题需要的时间是多长？高优先级的问题是否会对解决区间有影响？解决问题的时间间隔会随时间而减少吗？

50%的问题在一天内解决，75%是42天，90%是140天

关于优先级，有两种标注优先级方式，一种是报告问题者标注优先级，这样不会对区间的大小造成影响，另外一种是问题涉及的用户数量，这样会有优先级越高解决的区间越小的特点。

关于时间，以1997年一月为分割点，之后的一段时间比前期解决区间小很多，说明是随着时间减少了的。

##假设

这里提出了七个假设，将在Mozilla的研究中证实

- 假设1：开源软件一般会有一个不大于10-15人的核心开发团队，该团队控制着整个代码库，且贡献了80%的新功能

- 假设2：如果团队非常庞大，以至于在合理的时间框架内前10-15人不能开发80%的代码，那么就有必要采用严格的代码归属制度将开发团队分组

- 假设3：成功的开源项目中修复缺陷的团队会比核心团队大一个数量级，报告错误的团队会再大一个数量级

- 假设4：拥有强大核心团队的项目如果没有超过核心数量的贡献者，那么他们即使能够开发出新的功能也会因为缺少发现问题和修复问题的机构而失败

- 假设5：如果测试水平相当，开源项目会比只有特性测试的（没有系统测试）一般商业项目缺陷密度要低

- 假设6：成功的开源软件中，开发者同时也会是软件的使用者

- 假设7：开源项目对客户反映的问题处理速度很快

##Mozilla的研究

- Mozilla的开发是怎样的一个过程

公众开始的时候对Mozilla有很高的预期，但是它获得的智齿以及开发人员等等资源都不够，甚至有一名核心人员因为各种条件的缺乏出走。不过在改进之后，Mozilla已经在HP、Oracle、Sun等主流公司获得了广泛的应用，这是它良好的质量和扩展性的体现

1、角色和职责

目前Mozilla的主要负责人是mozilla.org的12人，其中有4人主要从事浏览器应用的编写，其他人有web应用、bugzilla维护等等各种任务，各个模块的决策权被分配到最接近那一部分代码的人，但是核心人员拥有决策权的取消权和最终决策权。开发者向CVS提交代码改变需要经过模块负责人的准许。

2、确定工作内容（该修复哪些问题）

Mozilla.org有一个确定的时间表和下一个开发版本的特性表，同时拥有决策权，但是需要花很长时间确定开发社区同意这些决定

任何人都可以报告问题或者是提出改进意见，使用的是Bugzilla工具，要求请求者有一个Bugzilla的账户。与apache不同的是，Bugzilla显然更成熟，它能帮助报告者查看最近的bug避免重复报告，并且要求报告者提供必要的细节使bug分辨变得更加简单。同时也便于错误的重现，方便改进。

3、工作分配和实施

比起apache的邮件通知方式，Mozilla的Bugzilla显然更有效率，开发社区可以根据自己的专长寻找他们擅长的更改，如果缺少这样的专业知识，可以在该report上标明需要help，这样核心人员可以参与分配。而且已经分派的任务不会再出现在Bugzilla上面，避免了重复劳动

4、预发布测试

Mozilla有一个名为“smoke test”的daily测试，如果build失败，或者是检测到错误，开发人员将会被每天提醒直到，这一部分被修复。

Mozilla有六个完整的测试团队，分别负责不同的模块，有严谨的测试架构。

5、检查

在新的代码进入代码库之前，Mozilla有两个检测模块，一个是该模块拥有者自身的检查，一个是与该模块无关的指定组在其发布之前的最终检查。

6、管理发布版本

Mozilla有两个发布后的检测工具，Tinderbox和milestone，前者检测在特定平台下的代码问题，并且会报告代码较之前版本的变化和作者。而milestone会报告更多相关的内容。两个工具报告周琦分别是一天和大概一个月

以上对Mozilla开发做了综述，以下几个问题是结果量化的部分（注意Mozilla比apache规模大很多，Mozilla有78个不同的模块，其中有的比Apache整个项目还大）

- 分别有多少人参与了代码编写、问题报告、修复漏洞的工作

从CVS上我们看到有486人在贡献代码，有412人对被接受的问题报告的修正有贡献

而从Bugzilla来看，有6837人报告了58K条错误，有1403人报告了11616条刻意被追踪到代码变化的问题报告，任何一个模块整体参与报告的人数数量级在500-1500之间，最大的一个达到了3000量级

6873人中只有5%创建的PR是内部的，另外他们报告了58KPR中的47%，这说明Mozilla比起ApachePR报告的分布更不均匀，113人就报告了58K中的30K，他们平均每人报告100条以上。

- 人们在参与的过程中是否会变换角色，还是一直担任同一角色？所有人的工作量都是差不多的吗？谁在做problem report？

从代码库的累计贡献来看，Mozilla的整体趋势和Apache差不多，但是由于整体规模比较大，所以核心团队比Apache更大一些。开发社区所占的比例相较Apache没有很大改变。

Apache的PR报告分布很均匀，但是Mozilla差别则较大，50%的PR报告来自113个人，第一名更是报告了1000条之多，而Apache最高的仅报告了32条。他们之中的46人没有贡献任何代码，而且有25人是外部人员，从中我们可以分析出，Mozilla有一个涵盖了内部和外部人员的专门测试小组。

由于多数的核心人员都是全职员工，且核心团队规模较大，我们将它与传统的商业项目对比，发现Netscape生产率确实很高，甚至高于某些典型的商业项目。

而且有一个很重要的特点，有一个核心团队的成员在所有七个主要模块中都有出现，有38个核心成员在两个核心模块中出现，虽然项目的不同会有一定的影响，但是我们显然可以看出，这种混合式的开发模式比传统的商业模式生产力要高。

- 代码贡献者在哪一部分工作？是严格的一个文件还是模块水平？

Apache的代码归属问题比较模糊，没有特定的负责人，但是Mozilla是强制开发者遵循负责人制度的，每一个commit都需要模块负责人的同意才能进行，所以我们考察模块是由哪些人提交的没有意义，它们都是模块负责人提交的

- Mozilla的缺陷密度是怎样的水平？

与Apache一样考虑系统测试前的缺陷密度，我们发现，Mozilla的缺陷密度与Apache是一个数量级，低于普通商业项目数倍。

- 解决问题需要的时间是多长？高优先级的问题是否会对解决区间有影响？解决问题的时间间隔会随时间而减少吗？

在Bugzilla所有的57966条PR中，99%的都有创建日期和状态更改日期，其中85%已经通过RESOLVED状态，46%状态是FIXED，表明已经被修复到代码库中，83%状态是VERIFIED，表明检查人员同意修复。

相比较Apache，Mozilla的修复时间要更长一些。

导致了fix和代码改变的PR有一半在30内解决，而没有导致的有一半在15天内就解决了。

优先级的影响也很大，P1P3的在30天内被解决，P2在80天内被解决，而P4和P5则需要超过100天。根据上面提到的，优先级造成的影响比较大说明参与者非常遵循Mozilla的优先级规定。这也是Mozilla分模块并统计影响的用户的数量确定优先级的好处。

##假设检验

- 假设1：开源软件一般会有一个不大于10-15人的核心开发团队，该团队控制着整个代码库，且贡献了80%的新功能

- 假设2：如果团队非常庞大，以至于在合理的时间框架内前10-15人不能开发80%的代码，那么就有必要采用严格的代码归属制度将开发团队分组

上面两个假设是得到Mozilla研究数据支持的，分析原因可能是当多数人在做非常相同的工作时，少数几个对工作相对了解且被大家信任的人担当分配者可能会获得更高的效率。但是当这个核心的数量超过了15人的时候交流会出现一些问题（Mozilla核心团队是22-26人），因此正如我们假设的那样，Mozilla设定了严格的代码归属制度。

- 假设3：成功的开源项目中修复缺陷的团队会比核心团队大一个数量级，报告错误的团队会再大一个数量级

根据上面Mozilla研究数据，三个数字之间差距确实很大，但是没有达到Apache那种程度，究其原因，可能是Mozilla的混合开发模式导致的，鉴于我们的假设是针对纯开源软件的开发，所以我们没必要认为该假设是错误的。

- 假设4：拥有强大核心团队的项目如果没有超过核心数量的贡献者，那么他们即使能够开发出新的功能也会因为缺少发现问题和修复问题的机构而失败

这一点无法从Mozilla现有的数据中得到验证

- 假设5：如果测试水平相当，开源项目会比只有特性测试的（没有系统测试）一般商业项目缺陷密度要低

该假设基本上也得到了验证，Apache和Mozilla的缺陷密度（系统测试前）确实都比一般的商业项目低

- 假设6：成功的开源软件中，开发者同时也会是软件的使用者

提出该假设的原因是开发者是计算机领域的专家，提出的问题自然质量也会更高，虽然我们没有直接的数据表明Mozilla有多少开发者在使用它的浏览器，但是常识告诉我们一个有专业知识的开发者在开发过程中没有使用过他的产品是不可能的。，这条假设也可以认为是支持的。

- 假设7：开源项目对客户反映的问题处理速度很快

Mozilla的反应时间要比Apache长很多，但是这是由于它的混合开发属性导致的，其中反应时间可能包含了汇报给owner的时间等，所以该条假设也很难否定。

#总结

我们分别研究了两个成功的卡源软件项目，从中分析出一些共同点而且，我们提出的假设也得到了很好的验证，总结起来开源软件的特点如下：

- 开源软件一般会有一个不大于10-15人的核心开发团队，该团队控制着整个代码库，且贡献了80%的新功能

- 如果团队非常庞大，以至于在合理的时间框架内前10-15人不能开发80%的代码，那么就有必要采用严格的代码归属制度将开发团队分组

- 成功的开源项目中修复缺陷的团队会比核心团队大一个数量级，报告错误的团队会再大一个数量级

- 如果测试水平相当，开源项目会比只有特性测试的（没有系统测试）一般商业项目缺陷密度要低

- 成功的开源软件中，开发者同时也会是软件的使用者

**四、linux文件系统的演变**

#linux文件系统演变的研究

##题目

A Study of Linux File System Evolution

##研究的问题及研究背景

问题

重要的Linux开源文件系统的代码库很难读懂，文件系统的位置、漏洞的类型特点、性能特点、被最常利用的可靠性特征等信息都不为人所知，开发者和工具制造商也不能很好地设计更好的系统和使自己的工具更加贴近实际。

背景

开源文件系统的重要性

Linux Ext4、XFS和Btrfs等开源的文件系统仍然是世界上现代存储的主要组成部分

智能手机上的许多用户数据由本地文件系统来管理

绝大多数桌面用户没有对数据进行备份的习惯，因此本地文件系统在管理用户数据上作用很关键

随着技术发展，我们期望能开发出更好更新的文件系统

了解以往文件系统的发展进程有助于我们对症下药

bug补丁的分析占了大部分的研究，其中性能和可靠性的补丁是很普遍的

文件补丁中有一个带有注释的数据集

Linux文件系统中存在一个非常明显的潜在相似性，可以利用这种共性改进下一代文件系统和工具

##研究方法论

###研究材料（文件系统）的选择

综合考虑了可靠性、不同数据结构、多种性能优化、多样的先进特性、完善性等，选择了六种文件系统以及相关的模式：Ext3-JBD、Ext4-IBD2、XFS、Btrfs、ReiserFS和JFS

###文件系统补丁分类

分类的标准要从我们的目的出发，因此确定了以下三个参考依据，按照这些问题进行补丁的分类：

1、综述：文件系统中最多的补丁类型是什么？文件系统演变时补丁如何变化？不同类型的不定是否大小不同？

2.Bugs：文件系统重存在什么类型的bug？包含哪些成分的文件系统存在的bug更多？不同的bug产生的不同结果是什么？

3.性能和可靠性：文件系统为了提高其性能采用什么技术？哪些可靠性增加功能被计划加入到文件系统中？

在后面几节会分别从这几个方面阐述

文章中从Linux2.6文件系统中检测了5079个补丁，根据补丁中头文件和类型体中的信息将其分类

##补丁综述

###补丁类型的划分

分为五类：

bug修复（Bug）、性能改善（Performance）、增强可靠性（Reliability）、引入新特性（Feature）、代码维护性质（Maintenance）

每一中补丁通常只是其中的一种。

从文章中给出的图表中可以观察到每种补丁类型的数量和相关性，几种补丁的百分比十分相近，其中补丁的维护在几乎所有的文件系统中是比例最高的，典型的补丁维护如提高读功能，简化结构以及使用抽象的释放。这种补丁显示了维护好一个复杂开源系统的花费。由于意义不大而且较为复杂，之后不再重点研究它。

除了维护补丁，bug补丁也有很多，占据了将近40%的补丁，即使是成熟的文件系统中bug也是很多的。有些bug是伴随着文件系统一直存在的，这种类型之后会详细讲解。

性能和可靠性的补丁比较少

总结：近一半的补丁是维护型的；bug补丁有很多，而且新系统或者成熟的系统都有很多；所有文件系统都为性能和可靠性进行着改善；功能补丁比例很小。

###补丁的趋势

不同补丁类型所占比例是否会随着文件系统的使用时间增加或减少？

补丁的百分比随着时间稳定；

较新的文件系统会偶而出现一些偏差；

即使是稳定的系统，补丁bug也不会消失

###补丁的大小

文章中使用了一个补丁增加或者删除代码的行数综合来定义补丁的复杂度

bug补丁都很小；

复杂的文件系统包含的bug补丁很大；

可靠性补丁和性能补丁处于中等水平；

功能补丁很明显比别的补丁大。

##文件系统的bug

这一部分将详细研究文件系统bug来认识它们的模式和它们造成的影响。

###代码和bug的相关联系

文件系统的代码行数跟bug的相关性研究

文件系统普遍包含相似的逻辑功能，我们将其划分为九中逻辑功能：

balloc、dir、extent、file、inode、trans、super、tree、other

对比发现：

文件、索引和超级块组件包含一系列不成比例的补丁；

事务代码很大而且包含的补丁成比例；

树形结构不容易出错使用起来也不需要太过于担心。

###bug模式

理解典型的bug类型意义很大，因为不同的类型的bug要求不同的检测和修补

根据其产生的原因，文件系统的bug可以分为四中类型：

Error Code、Memory、Concurrency、Semantic

在图表2（b）中可以看出这四种bug对应的比例，可以得出以下结论：

除了维护，补丁修复也是非常常见的补丁类型；

超过一般的文件系统bug是语义bug，找到并修复之需要专业知识；

文件系统的并发性bug所占的比例远大于用户层软件的bug；

内存bug和错误代码bug在增加但是比例很小。

###bug趋势

文件系统的bug模式会不会随着时间改变？如果改变会变成什么样？

研究发现：

bug模式随时间的变化不明显，增加和降低都是循环的；

偏差较大是由于主要数据结构改变引起的。

###bug的影响

按照影响划分bug：数据损坏、系统崩溃、无法预料的错误、死锁、系统挂起、资源泄漏

对应关系：

语义性bug：所有的影响

并发性：死锁、数据损坏、悬挂

内存：内存泄露、崩溃

错误代码bug引起的影响较小

###bug模式举例和分析

语义bug：

错误的状态修改和逻辑错误占了语义bug的大部分；

配置错误也很常见；

错误的I/O很少但是后果很严重；

这类bug需要专业知识才能明白。

并发性错误

内存bug：

资源泄露占主导地位；

空指针简介引用也很普遍；

故障路径是其产生的主要途径；

多数此类bug都比较容易修复。

错误代码bug：

发生在缺少错误处理和错误的错误处理下；

容易修复。

###故障路径

所有文件系统中大部分bug产生于不正确的操作因其的错误和故障；

内存相关性错误在这些很少执行上午代码路径中很普遍；

四分之一的语义bug都实在故障路径中发现的。

##性能和可靠性

###性能补丁

性能补丁是为了改善现有的设计和实现，将其划分为六部分：

Synchronization、Access Optimization、Schedule、Scalability、Locality、Other

同步性的性能补丁占了总性能补丁的四分之一；

存取不定时用了缓冲和避免工作策略来优化性能；

进程调度补丁提高了I/O的调度时间如批处理的写人，预读取进高速缓冲避免了I/O不同步问题。

###可靠性补丁

提高误差传播，提供了更多的调试信息。

可靠性补丁会使文件系统更加稳固；

大多数补丁添加了简单地检测，防止数据从磁盘读取出来出现坏损，通过返回崩溃性错误改善可用性；

在编译阶段注释可以帮助找到错误；

调试补丁增加了特征信息；

可靠性补丁的使用在整个文件系统中非常常见。

##总结

本文进行了一项复杂的研究，研究了六大Linux文件系统的5079个补丁；

我们分析大量的bug数据（1800个bug）。

这些发现可以被开发者使用，认真学习这些结论可以帮助我们开发出更加健壮，可靠和高性能的文件系统。

# 附录B 参考内容