**密级:**



**硕士学位论文**

**大数据系统应用可靠性测试框架设计与实现**

**作者姓名： 郑莹莹**

**指导教师: 叶丹 研究员**

**中国科学院大学软件研究所**

**学位类别: 工学硕士**

**学科专业: 软件工程**

**培养单位: 中国科学院大学软件研究所**

**2017年 4月**

**Design and Implementation of a reliability benchmarking framework for big data system**

**By**

**Zheng Yingying**

**A Dissertation Submitted to**

**University of Chinese Academy of Sciences**

**In partial fulfillment of the requirement**

**For the degree of**

**Master of Computer Software and Theory**

**Institute of Software**

**University of Chinese Academy of Sciences**

**April, 2017**

**独创性声明**

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明。

签名：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**关于论文使用授权的说明**

本人完全了解中国科学院软件研究所有关保留、使用学位论文的规定，即：中国科学院软件研究所有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；中国科学院软件研究所可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。

（保密的论文在解密后应遵守此规定）

签名：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

**大数据系统应用可靠性测试框架设计与实现**

**摘要**

当前，Spark、Flink等分布式处理框架被广泛应用于大数据的处理分析，然而在处理大数据时，经常出现内存溢出、IO异常、任务超时等运行时错误，这些错误会直接造成应用执行失败。然而，现有的测试基准主要针对系统的性能提供测试，没有考虑系统的可靠性问题；并且，这些测试基准通常使用常规数据以及固定的配置来进行测试，缺乏测试的多样性。针对大数据系统面临的多样及复杂的运行时错误以及现有测试基准的不足，论文设计并实现了面向大数据系统应用的可靠性测试基准框架，提供可视化的测试界面，支持自定义的数据生成和自动参数组合测试。

设计与实现大数据系统应用的可靠性测试基准框架，论文介绍了可靠性测试基准的设计，并针对以下关键技术进行研究。首先，本文提出了针对大数据应用的异常数据生成方法，定义了异常数据的概念和数据的多种随机分布形式；同时，通过分析应用程序特征，提出应用计算特性与数据异常特征对应关系，并给出了特定应用的异常数据的生成规则。其次，本文提出了针对大数据应用的参数组合测试方法，采用组合测试，并通过贪心算法对系统和应用参数进行组合空间削减测试；针对不满足参数独立性以及参数取值的相关性的，提出探测性参数验证方法，通过指数增长的慢启动方式来确定最差的资源占用的参数取值。

论文详细的介绍了大数据系统应用可靠性测试基准的设计与实现，并将该可靠性测试基准框架应用在Spark系统上。通过对Spark上的基准应用进行可靠性测试，验证了本文提出的异常数据生成以及参数组合测试方法的可用性，并在6个应用（Join、Mix、RandomForest、LogisticsRegression、ALS、PageRank）中发现了三种类型的错误（内存溢出错误、运行超时以及计算结果错误）。

**关键词：**可靠性；基准测试；异常；大数据系统；大数据应用；

**Design and Implementation of a reliability benchmarking framework for big data system**

**ABSTRACT**

**Keywords:** reliability, benchmark, error, large data system, large data application

目录

[1 绪论 3](#_Toc478388600)

[1.1 研究背景 3](#_Toc478388601)

[1.2 研究内容 4](#_Toc478388602)

[1.3 论文组织 5](#_Toc478388603)

[2 大数据系统及应用可靠性相关工作 6](#_Toc478388604)

[2.1 大数据系统及应用 6](#_Toc478388605)

[2.1.1 大数据系统 6](#_Toc478388606)

[2.1.2 大数据应用 9](#_Toc478388607)

[2.2 大数据系统及应用的可靠性问题 10](#_Toc478388608)

[2.2.1 可靠性定义 10](#_Toc478388609)

[2.2.2 可靠性问题分析 11](#_Toc478388610)

[2.3 测试基准框架研究现状 12](#_Toc478388611)

[2.4 测试基准需求 14](#_Toc478388612)

[3 可靠性测试基准设计 16](#_Toc478388613)

[3.1 基准应用 16](#_Toc478388614)

[3.1.1 应用类型 16](#_Toc478388615)

[3.1.2 工作负载 17](#_Toc478388616)

[3.2 测试数据 20](#_Toc478388617)

[3.3 基准执行 21](#_Toc478388618)

[3.4 测试度量 22](#_Toc478388619)

[4 可靠性测试基准关键技术 23](#_Toc478388620)

[4.1 数据生成方法 23](#_Toc478388621)

[4.1.1 异常特征 23](#_Toc478388622)

[4.1.2 数据概率分布 24](#_Toc478388623)

[4.1.3 数据生成 26](#_Toc478388624)

[4.2 参数组合测试方法 31](#_Toc478388625)

[4.2.1 参数配置 32](#_Toc478388626)

[4.2.2 组合测试 33](#_Toc478388627)

[4.2.3 参数组合空间削减 36](#_Toc478388628)

[5 可靠性测试基准框架设计与实现 40](#_Toc478388629)

[5.1 系统架构 40](#_Toc478388630)

[5.2 系统总体设计 41](#_Toc478388631)

[5.2.1 Web模块设计 42](#_Toc478388632)

[5.2.2 基准模块设计 43](#_Toc478388633)

[5.3 Web模块实现 44](#_Toc478388634)

[5.3.1 架构实现 44](#_Toc478388635)

[5.3.2 执行流程 47](#_Toc478388636)

[5.4 基准模块实现 48](#_Toc478388637)

[5.4.1 数据生成器实现 48](#_Toc478388638)

[5.4.2 组合参数发生器实现 53](#_Toc478388639)

[5.5 可靠性测试应用验证 55](#_Toc478388640)

[5.5.1 实验环境 56](#_Toc478388641)

[5.5.2 参数配置 56](#_Toc478388642)

[5.5.3 实例及分析 57](#_Toc478388643)

[6 结束语 63](#_Toc478388644)

[6.1 论文贡献 63](#_Toc478388645)

[6.2 未来工作展望 63](#_Toc478388646)

[参考文献 66](#_Toc478388647)

[发表文章 70](#_Toc478388648)

[致谢 72](#_Toc478388649)

# 绪论

本章介绍论文的研究背景、主要工作和论文组织方式。

## 研究背景

随着互联网、移动互联网、物联网的发展，越来越多的领域产生了“海量”和“高速”的数据[1]。例如，在金融领域，其日常运营过程中会产生大量的数据，这些数据产生速度快，并且时效性短[2]。又如，在移动通信领域，一个大型城市中每分钟都会有超过8万条的位置更新数据，每天的网络承载流量高达100TB[1]。这些数据具有数据规模大，产生速度快的特点，而且在这些数据中也隐藏着巨大的价值。在金融领域，通过对这些海量数据进行计算和分析，发现隐藏在其中的特征，可以帮助金融行业进行实时决策，从而更好的进行风险管理以及实现商业智能化。在移动通信领域，如果可以对这些海量数据进行实时的挖掘分析，可以降低电话诈骗造成的损失。因此，对大数据应用场景下的海量数据的处理分析已经成为一个迫切的需求。

为了应对海量数据以及发现其背后隐藏的巨大价值，许多大数据系统及大数据应用应运而生。常见的大数据系统有MapReduce[3]、Apache Storm[4]、Hadoop[5]、Apache Spark[6]、Apache Flink[7]等。这些分布式处理框架被广泛应用于社交网络、搜索引擎、数据采集及数据查询等应用场景中，而这些应用场景又衍生出了一系列用于处理特定领域的大数据应用。常见的大数据应用有SQL查询、大规模图分析、机器学习以及流式应用等。然而，现有的大数据应用在处理数据时，经常出现内存溢出、I/O异常、任务超时等运行时错误，以及在流处理过程中的数据完整性和计算结果错误等。这些可靠性的问题将会直接造成应用执行失败，甚至产生更加严重的后果。

通过开源论坛、社区、bug issues以及相关论文的研究发现，本文分别分析了产生运行时错误以及计算完整性问题的原因。（1）首先，对于I/O异常、内存溢出及任务超时等运行时错误，其产生原因 [8][9][10]包括不恰当的配置参数（输入的数据块过大，分区数目过小，分区函数不均衡等）、异常数据（数据维度过高、数据倾斜等）以及用户代码缺陷（内存泄漏、较高的时间或空间复杂度等）等。（2）其次，对于数据错误（如数据丢失、数据重复等）以及状态错误（状态丢失、快照错误等）等数据和计算完整性问题，根据博客、论坛等的实证分析[11][12][13]，发现其产生原因主要有数据流速过快、Task失效以及快照恢复机制不完善等。在上述分析的基础上，本文将运行时错误以及计算结果错误等问题产生的原因总结为以下三点：（1）系统错误，包括硬件错误（如CPU、内存、网络以及硬盘等错误）和软件错误（如设计缺陷、逻辑错误、实现bugs等）。（2）应用错误，如参数配置不当或代码缺陷等。（3）数据异常，如数据维度过高或数据倾斜等。

对于用户来说，他们希望了解部署好的应用是否存在潜在的应用错误；对于系统设计者和管理者来说，他们希望了解部署的或更新的系统是否有潜在的系统错误。目前，针对这些应用错误和系统错误的解决方案[14][15]通常是在出现问题之后，再针对某一类应用及问题进行分析诊断。通过测试来发现错误是一种常用的方法，然而当前还没有一个通用的检测方法能够提前发现系统、应用和数据存在的潜在问题。

通过调研发现，现有的大数据平台测试基准，如HiBench[16]、BigSQL benchmark[17]、Spark-perf[18]、Graphalytics[19]以及SparkBench[20]等，关注的焦点通常是特定的大数据平台上的性能或扩展性的基准测试；并且，主要使用常规的输入数据（固定的真实数据集或其简单合成）以及固定的参数配置进行测试。这些测试基准都不能直接用于检测潜在错误，因而对于大数据系统的可靠性测试，目前还没有一套类似的测试基准提供支持。

大数据系统在处理“海量”和“高速”数据时，是否可以高可靠的应对高负载的场景已经成为一个亟待研究的课题。针对大数据系统面临的可靠性问题以及现有测试基准的不足，本文将研究如何开发一个针对大数据系统应用的可靠性测试基准框架。该框架的系统目标主要包括以下几点：

1. 构建一个大数据系统的可靠性测试基准，支持SQL查询、大规模图分析以及机器学习中使用广泛的典型应用的可靠性测试；并提供可配置的数据生成以及自动化的参数组合测试。
2. 集成数据生成、数据存储、参数组合测试以及报告生成模块，构建一站式大数据系统的可靠性测试基准平台；将开发人员从算法学习、测试脚本编写等复杂繁琐的工作中抽离出来。
3. 构建基于Web的可视化界面，可配置的数据生成以及参数组合测试界面，降低测试人员的使用难度，加快测试速度；自动生成的测试报告，降低分析人员的分析成本。

## 研究内容

本文设计并实现了大数据系统的可靠性测试基准框架。为了检测潜在的应用程序或系统错误，可靠性测试基准通过生成异常输入数据，并结合特定的系统及应用的配置来测试应用程序。与性能测试基准不同，该基准（1）根据应用特性生成异常输入数据，同时（2）基于参数特征减少参数组合空间。该大数据系统可靠性测试基准框架开发中的关键技术，主要包括以下几点：

1. 提出了针对大数据应用的异常数据生成方法。定义了异常数据的概念，并通过分析应用程序特征，给出了特定应用的异常数据的生成规则，进而生成相应的异常数据（如分布异常、维度过高等特征）。
2. 提出了一种针对大数据应用的异常参数生成方法。采用贪心算法对系统和应用参数进行组合空间削减测试。提出一种探测性参数验证方法，通过指数增长的慢启动方式来确定最差的资源占用的参数取值。
3. 提出了针对流式大数据应用的高负载生成方法。该方法通过构建多个负载发生客户端，并通过并行划分数据流量、流速的方法，来生成高负载的应用数据。

最后，论文介绍了大数据系统的可靠性测试基准的框架的实现，并将该可靠性测试基准框架应用在Spark系统上。通过对Spark上的典型应用进行可靠性测试，已经在6个应用中发现了三种类型的错误（如，内存溢出错误、运行超时以及计算结果错误），并给出了测试结果及部分错误分析。

## 论文组织

论文的后续章节组织方式如下：

第二章介绍大数据系统及应用可靠性相关工作的研究。首先，介绍了大数据系统和大数据应用的研究现状；接着，介绍了大数据系统及应用面临的可靠性问题，包括可靠性定义以及可靠性问题的分析；最后，介绍了测试基准框架的研究现状。

第三章介绍可靠性测试基准的设计。分别介绍了基准需求，基准应用，测试数据，基准的执行以及测试度量。

第四章介绍可靠性测试基准的关键技术。首先，定义了异常数据概念以及数据概率分布形式，并介绍了数据生成方法；然后，介绍了参数配置，组合测试以及参数组合空间削减策略。最后介绍了大数据系统应用流式负载生成方法。

第五章介绍大数据应用可靠性测试基准框架实现。首先，介绍了系统架构；然后，介绍了系统实现，包括系统总体设计、数据生成器以及组合参数发生器；最后，对实现的可靠性测试基准框架进行应用验证，介绍了实验环境、参数配置和可靠性测试的实例及分析。

第六章总结了全文，主要包括论文的工作、论文贡献以及对未来工作的展望。