湖南大學

HUNAN UNIVERSITY

本科生毕业论文（设计）

论文(设计)题目: 川菜和湘菜在辣度上的对比研究

学生姓名: 十三香

学生学号: 201212313231

专业班级: 食品工程

学院名称: 后勤保障部

指导老师: 王守义

2025 年 4 月　日

湖 南 大 学

毕业论文（设计）原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文（设计）是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文（设计）不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学生签名：　　日期：2025 年　月　日

毕业论文（设计）版权使用授权书

本毕业论文（设计）作者完全了解学校有关保留、使用论文（设计）的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文（设计）的复印件和电子版，允许论文（设计）被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本论文（设计）的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本论文（设计）。

本论文（设计）属于

1、保　密□，在_____年解密后适用于本授权书。

2、不保密□。

(请在以上相应方框内打“√”)

学生签名：　　日期：2025 年　月　日

导师签名：　　日期：2025 年　月　日

川菜和湘菜在辣度上的对比研究

摘　　要

摘要是论文内容的简要陈述，是一篇具有独立性和完整性的短文。摘要应包括本论文的创造性成果及其理论与实际意义。摘要中不宜使用公式、图表，不标注引用文献编号。避免将摘要写成目录式的内容介绍。

关键词： 关键词1；关键词2；关键词3；关键词4

A Research Conducted on the Spiciness between SiChuan Cusine and Hunan Cusine

Abstract

An abstract is a brief summary of a research article, thesis, review, conference proceeding or any in-depth analysis of a particular subject and is often used to help the reader quickly ascertain the paper's purpose. When used, an abstract always appears at the beginning of a manuscript or typescript, acting as the point-of-entry for any given academic paper or patent application. Abstracting and indexing services for various academic disciplines are aimed at compiling a body of literature for that particular subject.

Key Words: Key Word1; Key Word 2; Key Word 3; Key Word 4

目　　录

插图索引

附表索引

1 绪论

你好世界。

1.1 动机

本文的动机在于。

1.2 贡献

本文在优化机制上所做出的贡献是。

1.3 文章结构

本文编排的结构组织如下：第 2 章介绍 eBPF 和 wasm 等相关工作；第 3 章介绍本文在两者优化机制上所做的贡献；第 **??** 章介绍本文构建实验的方式和测试结果；第 5 章将给出本文的讨论；第 6 章总结全文。

2 相关工作

2.1 高级编程语言

2.1.1 Java字节码解释器

Java虚拟机(JVM)转译和执行由Scala，Java，Groovy和Kotlin等高级编程语言编译得到的Java字节码。且当前的JVM系统由不同的组织和公司所开发，如Oracle开发的HotSpot[1]，阿里巴巴开发的DragonWell[2]和IBM开发的OpenJ9[3]。

因JVM功能性复杂且规模巨大[4]，所以潜在的缺陷不可避免[5]。 Jia,et al.[5]观察到HotSpot公开的缺陷报告在每年的总数上虽然下降，但其即时编译器部分出现的缺陷却显著增加，有的甚至可以引起JVM的崩溃[6]。

Chaliasos,et al.[7]通过按照表 2.1 所示的缺陷追踪网站，从中收集并整理出 4153 个已被修复且由测试用例确保不会再重现的缺陷；其工作还随机挑选了320个缺陷，结合开发者讨论以及缺陷报告，总结形成了五类的缺陷以及其根因，结果如图 2.1 所示。

表 2.1 JVM类型缺陷的收集结果[7]

语言	缺陷追踪网站	链接	问题总数	最早记录时间	最近记录时间	缺陷收集	后-筛选量(post-filtering)
Java	Jira	https://bugs.openjdk.java.net/rest/api/latest/search	10872	2004-02-11	2021-03-26	1252	873
Scala2	GitHub	https://api.github.com/repos/scala/bug	12315	2003-05-22	2021-03-11	1180	1067
Scala3	GitHub	https://api.github.com/repos/lampepfl/dotty	4286	2014-02-01	2021-03-21	429	366
Kotlin	YouTrack	https://youtrack.jetbrains.com/api/issues	40998	2011-10-28	2021-04-09	2189	1601
Groovy	Jira	https://issues.apache.org/jira/rest/api/2/search	9710	2003-09-25	2021-04-09	300	246

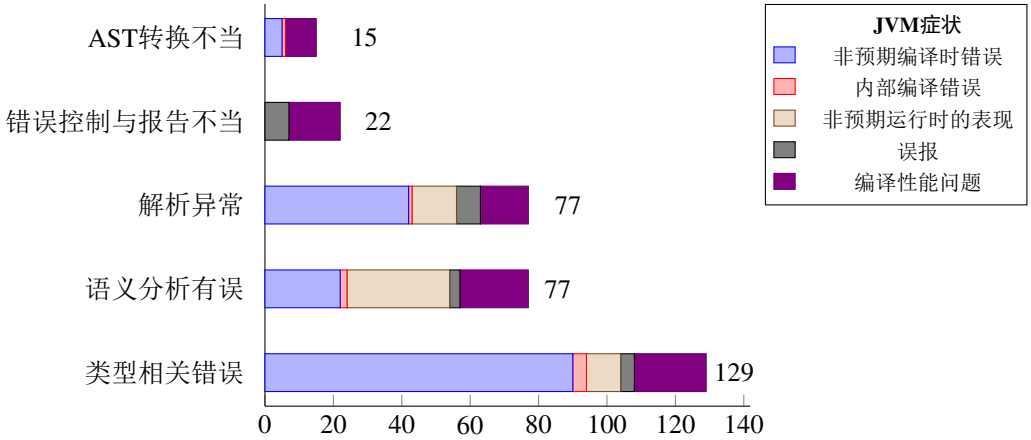


图 2.1 JVM各症状的错误原因分布[7]

其中，AST转换不当是指编译器没有产生和原始输入程序在逻辑上保持一致的转换程序，占JVM缺陷的4.69%，会引发非预期的编译时错误和内部编译错误。错误控制与报告不当是指JVM解释器正确辨识出程序错误，但错误处理和报告机制没有产生预期的响应结果。错误控制与报告不当占JVM缺陷的6.88%，此类缺陷都与崩溃和错误报告有关。

解析异常则是既不能解析一个标识符（即变量名、方法名或类名），也不能正确地检索到先前解析过的标识名。解析异常也占24.06%，由两项原因所致：

(1) 解析算法执行错误，如JDK-7042566是在相同函数名下选择参数更多的一个来执行，从而引发错误；

(2) 编译器错误查询；

(3) 作用域状态错误。

语义分析有误则指的是解释器对特定程序代码生成了错误的分析结果，占JVM缺陷的24.06%，由两方面原因所致：

(1) 没有验证检查语义，如问题Scala2-5878；

(2) 不正确的分析机制，如问题Scala3-4487。

最后的类型相关错误指的是在前端编译器中运用类型系统内定义的规则以及类型中定义的操作应用于输入的源文件之中，但因实现不当而导致的错误。这一部分的实现不当是造成非预期编译时错误的主要原因，且以40.31%(129/320)的比例使之成为JVM最常见的缺陷。且细分类型相关错误则仍有三组：

(1) 不正确的类型推断和类型变量代替，如缺陷报告所报告的KT-10711；

(2) 不正确的类型（强制或非强制）转换，如缺陷报告所报告的KT-9630；

(3) 不正确的类型比较和边界计算，如缺陷报告所报告的JDK-8039214。

2.1.2 JavaScript字节码解释器

JavaScript(JS)是被广泛使用的编程语言之一，其迅速的发展由超过200万个可重用的npm软件库生态所支撑[8]。JS常作为客户端一侧的web应用使用，驱动了当今世界上超过90%的web页面[9]。这种广泛的应用使得保证JS的安全性至关重要[10]。

JS通过自身的执行引擎解释执行且主流浏览器提供商均实现并管理着其编写的js引擎。Google浏览器使用V8引擎[11]， Mozilla的火狐浏览器使用SpiderMonkey引擎[12]，苹果公司的Safari浏览器使用WebKit[13]中的JS引擎，微软公司开发的Edge使用ChakraCore引擎[14]。这些引擎是浏览器的核心[15]，依次将JS源码转变为字节码和机器码。

而Ziyuan Wang et al.[16]汇总分析了V8，SpiderMonkey和Chakra三个主流JS引擎截至2022年已有的19019篇缺陷(bugs)报告，16437次修正和805个测试用例以及随机挑选的540个缺陷的根因，发现：

(1) Compiler和DOM是存在缺陷最多的部件，结果如表 2.2 和表 2.3 所示；
(2) 小型测试用例足以触发多数漏洞，如V8中70.79%的触发漏洞测试用例代码行数小于10行；
(3) JS引擎漏洞修复通常不复杂，多数仅需修改少量代码行和文件。如V8中76.86%的漏洞修复涉及代码行数少于100行；
(4) 对于修复缺陷的时间，V8中有80.33%的缺陷在半年内修复；SpiderMonkey引擎中有91.9%的缺陷是在半年内修复，且有4.33%是需要超过一年的时间才能修复；
(5) 规范语义缺陷是最常见的根因。除此之外，执行缺陷、特性以及函数调用缺陷均比其它类型的缺陷多。与V8和Chakra相比，SpiderMonkey有更多构建错误和更少内存错误。

研究为确保后续研究的可复现性，还将其成果分别以BSD，MPL，MIT许可证颁布公开于Github上[1][2][3]。

另外，基于JavaScript的Node.js在服务器端和桌面端也得到大量的应用[17]。因缺乏浏览器的安全沙箱机制，eval和exec注入API可能会引发严重的危害[18]，同时因开发者对分析工具接受度低且修复意愿不足，模块间还存在责任推诿问题[9]。

[1] https://github.com/njuptw/Empirical-Study-V8.
[2] https://github.com/njuptw/Empirical-Study-SpiderMonkey.
[3] https://github.com/njuptw/Empirical-Study-Chakra.

表 2.2 2022年JS引擎缺陷在源码文件中的分布[16]

V8		SpiderMonkey		Chakra	
源文件	缺陷数量	源码	缺陷数量	源码	缺陷数量
src/compiler	10525	js	3209	lib/Runtime/Library	4629
src/wasm	5070	dom	3082	lib/Runtime/Language	1984
src/builtins	4726	browser	2129	lib/Runtime/Base	1170
src/heap	3630	toolkit	1956	lib/Common/Memory	1004
src/objects	3087	third_party	1933	lib/Runtime/ByteCode	1001
src/runtime	2571	gfx	1807	lib/Runtime/Types	883
src/parsing	2147	devtools	1136	lib/wabt/src	676
src/interpreter	1779	taskcluster	1022	lib/Runtime/Debug	582
src/crankshaft	1178	layout	1013	lib/WasmReader	514
src/ast	1141	intl	962	lib/Jsrt	482
src/full-codegen	1089	netwerk	926	lib/Backend/arm64	264
src/debug	1073	modules	910	lib/Common/DataStructures	242
src/js	1049	js/src/jit	898	lib/common	240
src/ic	1034	mobile	730	lib/Common/Core	238
src/snapshot	1029	security	699	lib/Runtime/PlatformAgnostic	219
src/objects.cc	951	widget	540	lib/Backend/Lower.cpp	211
src/regexp	911	dom/media	534	lib/Backend/amd64	187
src/arm64	872	dom/base	468	lib/Parser/Parse.cpp	184
src/ia32	839	dom/ipc	367	lib/Backend/arm	170
src/arm	811	docshell	364	lib/Common/ConfigFlagsList.h	168

另外，S. Park et al.[19]围绕JS引擎的漏洞问题，实现了CRScope用于分类安全与非安全的缺陷，并评估了Exploitable和AddressSanitizer等工具和模型的性能。其工作所用的训练数据集从Google、Mozilla、Microsoft的Edge与IE浏览器以及GitHub库中收集。内容上包含165个触发安全缺陷的JS Poc以及174个触发非安全缺陷的PoC。同时，S. Park et al.还编译了与PoC对应的JS引擎，构成727个二进制文件以及766个实例，用于训练模型判断崩溃问题是否由安全缺陷所引发。其数据集公开[4]以支撑后续研究。

其训练模型和测试模型的方式采用了四折时间序列交叉验证方式[20]，将所有安全和非安全漏洞按其在目标二进制文件中的提交日期排序，而后按升序排列崩溃实例并均分成5个桶，以保证每个桶中的崩溃实例数量大致相同(约153个)。评估实验结果显示，S. Park et al.所实现的CRScope则在Chakra、V8 和SpiderMonkey的崩溃实例上以0.85、0.89和0.93的准确度，优于Exniffer的0.51和AddressSanitizer的0.63。

[4] https://github.com/WSP-LAB/CRScope.

表 2.3 2022年JS引擎中各组件缺陷分布情况[16]

(a) Google开发的V8

未修复缺陷（5191）		已修复缺陷（2827）	
组件名	数量	组件名称	数量
编译器	932	编译器	565
WebAssembly	855	JS语法	553
JS语法	831	Webassembly	518
运行时	648	运行时	317
基础架构	446	垃圾回收	232
垃圾回收	435	人类语言国际化	227
人类语言国际化	338	基础架构	182
API	253	API	111
构建文件	170	正则匹配	82
正则匹配	166	解释器	65

(b) Mozilla开发的SpiderMonkey

未修复缺陷（4499）		已修复缺陷（3502）	
组件名	数量	组件名称	数量
DOM	519	DOM	428
常规	397	常规	330
JavaScript	294	JavaScript	252
图形	251	图形	211
自动化发布	152	自动化发布	143
页面布局	149	Web平台测试	138
Web平台测试	144	页面布局	127
网络	142	网络	101
音视频 1	14	WebRTC	88
WebRTC	107	音视频	79

2.1.3 Lua字节码解释器

Lua是一个基于栈虚拟机的解释型语言，支持动态类型[21]。Lua被设计为嵌入式语言，主要用于扩展应用程序，而非独立开发程序。它高度依赖宿主程序提供的API，标准库函数的加载也需由宿主程序显式完成[22]。Lua官方在其官网有单独开设一个页面用于记录其解释器存在的缺陷[5]。同时还提供了各个版本的手册[6]以方便编程人员查阅和学习。Lua高度依赖宿主程序提供的API，甚至标准库函数的加载也需由宿主程序显式完成[23]。

[5] https://www.lua.org/bugs.html.

[6] https://www.lua.org/manual/.

3 内容要求

3.1 论文题目

题目应该简短、明确、有概括性。通过题目，能大致了解论文内容、专业特点和学科范畴。但字数要适当，一般不宜超过20字。必要时可加副标题。

3.2 摘要与关键词

3.2.1 论文摘要

摘要应概括反映出毕业论文(设计)的内容、方法、成果和结论。摘要中一般不宜使用公式、图表，不标注引用文献编号。中文摘要以300左右字为宜、外文摘要以250个实词左右为宜。

3.2.2 关键词

关键词是供检索用的主题词条，应采用能覆盖论文（设计）主要内容的通用技术词条（参照相应的技术术语标准），尽量从《汉语主题词表》中选用，未被词表收录的新学科、新技术中的重要术语和地区、人物、文献等名称，也可作为关键词标注。关键词一般为3～8个，按词条的外延层次排列（外延大的排在前面）。关键词应以与正文不同的字体字号编排在摘要下方。多个关键词之间用分号分隔。中英文关键词应一一对应。

3.3 目录

目录按章、节、条三级标题编写，要求标题层次清晰。目录中的标题要与正文中标题一致。目录中应包括绪论、报告（论文）主体、结论、致谢、参考文献、附录等。

3.4 正文

正文是毕业论文(设计)的主体和核心部分，一般应包括绪论、报告（论文）主体及结论等部分。

3.4.1 绪论

绪论一般作为第一章，是毕业论文(设计)主体的开端。绪论应包括：毕业（设计）的背景及目的；国内外研究状况和相关领域中已有的成果；设计和研究方法；设计过程及研究内容等。绪论一般不少于1.5千字。

3.4.2 主体

主体是毕业论文(设计)的主要部分，应该结构合理、层次清楚、重点突出、文字简练、通顺。主体的内容应包括以下各方面：

1. 毕业论文(设计)总体方案设计与选择的论证。
2. 毕业论文(设计)各部分（包括硬件与软件）的设计计算。
3. 试验方案设计的可行性、有效性以及试验数据的处理及分析。
4. 对本研究内容及成果进行较全面、客观的理论阐述，应着重指出本研究内容中

的创新、改进与实际应用之处。理论分析中，应将他人研究成果单独书写，并注明出处，不得将其与本人的理论分析混淆在一起。对于将其他领域的理论、结果引用到本研究领域者，应说明该理论的出处，并论述引用的可行性与有效性。

5. 自然科学的论文应推理正确，结论清晰，无科学性错误。
6. 管理和人文学科的论文应包括对所研究问题的论述及系统分析、比较研究，模型或方案设计，案例论证或实证分析，模型运行的结果分析或建议、改进措施等。

3.5 结论

结论是毕业论文(设计)的总结，是整篇设计报告（论文）的归宿。要求精炼、准确地阐述自己的创造性工作或新的见解及其意义和作用，还可进一步提出需要讨论的问题和建议。

3.6 参考文献

按正文中出现的顺序列出直接引用的主要参考文献。毕业论文(设计)的撰写应本着严谨求实的科学态度，凡有引用他人成果之处，均应按论文中所出现的先后次序列于参考文献中。并且只列出正文中以标注形式引用或参考的有关著作和论文。**一篇论著在论文中多处引用时，在参考文献中只能出现一次，序号以第一次出现的位置为准。**

3.7 致谢

致谢中主要感谢导师和对论文工作有直接贡献及帮助的人士和单位。

3.8 附录

对于一些不宜放入正文中、但作为毕业论文(设计)又是不可缺少的部分，或有重要参考价值的内容，可编入毕业论文(设计)的附录中。例如，过长的公式推导、重复性的数据、图表、程序全文及其说明等。

4 书写规范与打印要求

4.1 文字和字数

一般用汉语简化文字书写，字数在1.2万字左右，报告（内容）或软件说明书，字数在1万字左右。

4.2 书写

论文一律由本人在计算机上输入、编排并打印在A4幅面白纸上。毕业论文前置部分（即正文之前）一律用单面印刷，正文部分开始双面印刷。致谢和附录部分应单面起页双面印刷（如正文结束页为单页，则单数页背面不加页眉和页码，致谢单面起页，如致谢为单页，其背面亦不加页眉和页码）。

4.3 字体和字号

论文题目:	小2号黑体
章标题:	3号黑体
节标题:	小4号黑体
条标题:	小4号黑体
正文:	小4号宋体
页码:	5号宋体
数字和字母:	Times New Roman

4.4 封面

论文封面规范见（样张1），论文封皮一律采用白色铜版纸，封皮大小为A4规格。

5 讨论

本文的提出的设计虽然能较好的完成预期目的，但日后仍应从...出发。

6 结语

本文就当前湘菜和川菜之间目前存在的问题做了汇总研究，并探讨、搭建了相关实验以优化其中的配料比重。

参考文献

[1] Oracle. Hotspot[Z]. https://openjdk.org/. 2024.

[2] Alibaba. DragonWell[Z]. https://github.com/dragonwell-project/dragonwell11. 2025.

[3] IBM. Openj9[Z]. https://eclipse.dev/openj9/. 2024.

[4] A. Sonoyama, T. Kamiyama, M. Oguchi, et al. Performance Study of Kotlin and Java Program Considering Bytecode Instructions and JVM JIT Compiler[C]. in: 2021 Ninth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW). Matsue, Japan: IEEE, 2021: 127-133.

[5] H. Jia, M. Wen, Z. Xie, et al. Detecting JVM JIT Compiler Bugs via Exploring Two-Dimensional Input Spaces[C]. in: 2023 IEEE/ACM 45th International Conference on Software Engineering (ICSE). Melbourne, Australia: IEEE, 2023: 43-55.

[6] Webbug Group. Assert(false) failed: infinite loop in PhaseIterGVN::optimize[Z]. https://bugs.openjdk.org/browse/JDK-8290711. 2022.

[7] S. Chaliasos, T. Sotiropoulos, G.-P. Drosos, et al. Well-Typed Programs Can Go Wrong: A Study of Typing-Related Bugs in JVM Compilers[J]. Proceedings of the ACM on Programming Languages, 2021, 5(OOPSLA): 1-30.

[8] M. H. M. Bhuiyan, A. S. Parthasarathy, N. Vasilakis, et al. SecBench.Js: An Executable Security Benchmark Suite for Server-Side JavaScript[C]. in: 2023 IEEE/ACM 45th International Conference on Software Engineering (ICSE). Melbourne, Australia: IEEE, 2023: 1059-1070.

[9] C.-A. Staicu, M. Pradel, B. Livshits. SYNODE: Understanding and Automatically Preventing Injection Attacks on Node.Js[C]. in: Network and Distributed System Security Symposium. 2018.

[10] J. Eom, S. Jeong, T. Kwon. Fuzzing JavaScript Interpreters with Coverage-Guided Reinforcement Learning for LLM-Based Mutation[C]. in: Proceedings of the 33rd ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis. Vienna Austria: ACM, 2024: 1656-1668.

[11] Google. V8 javascript engine[Z]. https://chromium.googlesource.com/v8/. 2024.

[12] Mozilla. SpiderMonkey[Z]. https://spidermonkey.dev/. 2024.

[13] Apple. WebKit[Z]. https://webkit.org/. 2024.

[14] Microsoft. ChakraCore[Z]. https://github.com/chakra-core/ChakraCore. 2024.

[15] J. Lim, Y. Jin, M. Alharthi, et al. SOK: On the Analysis of Web Browser Security[Z]. 2021. arXiv: 2112.15561 [cs].

[16] Z. Wang, D. Bu, N. Wang, et al. An Empirical Study on Bugs in JavaScript Engines[J]. Information and Software Technology, 2023, 155: 107105.

[17] F. Xiao, J. Huang, Y. Xiong, et al. Abusing Hidden Properties to Attack the Node.js Ecosystem[C]. in: 30th USENIX Security Symposium (USENIX Security 21). USENIX Association, 2021: 2951-2968.

[18] S. Holtskog. Security in Node.Js from Theory to Practice[D]. OSLO: UNIVERSITY OF OSLO, 2023.

[19] S. Park, D. Kim, S. Son. An Empirical Study of Prioritizing JavaScript Engine Crashes via Machine Learning[C]. in: Proceedings of the 2019 ACM Asia Conference on Computer and Communications Security. Auckland New Zealand: ACM, 2019: 646-657.

[20] N. Le, B. Männel, M. Jarema, et al. K-Fold Cross-Validation: An Effective Hyperparameter Tuning Technique in Machine Learning on GNSS Time Series for Movement Forecast [C]. in: A. Çiner, Z. A. Ergüler, M. Bezzeghoud, et al. Recent Research on Geotechnical Engineering, Remote Sensing, Geophysics and Earthquake Seismology. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 377-382.

[21] R. Ierusalimschy, Luiz Henrique de Figueiredo, W. Celes. Lua 5.4 Reference Manual [A/OL]. 2020. https://www.lua.org/manual/5.4/.

[22] Petr Adámek. Security of the Lua Sandbox[D]. Czech Technical University in Prague, 2022.

[23] R. Ierusalimschy. Programming in Lua: 5.3 edition[M]. Roberto Ierusalimschy, 2016.

[24] C. Kim, S. Kim, H. G. Cho, et al. Short-Circuit Dispatch: Accelerating Virtual Machine Interpreters on Embedded Processors[C]. in: 2016 ACM/IEEE 43rd Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA). Seoul, South Korea: IEEE, 2016: 291-303.

[25] B. L. Titzer. A Fast In-Place Interpreter for WebAssembly[Z]. 2022. arXiv: 2205.01183.

[26] T. Bach, A. Andrzejak, R. Pannemans, et al. The Impact of Coverage on Bug Density in a Large Industrial Software Project[C]. in: 2017 ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM). Toronto, ON: IEEE, 2017: 307-313.

[27] S. Bhansali, A. Aris, A. Acar, et al. A First Look at Code Obfuscation for WebAssembly [C]. in: Proceedings of the 15th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks. San Antonio TX USA: ACM, 2022: 140-145.

[28] T. Usui, Y. Otsuki. Bytecode Jiu-Jitsu Choking Interpreters to Force Execution of Malicious Bytecode[R]. PPT. United States of America: Black Hat, 2024.

[29] S. Cao, N. He, Y. Guo, et al. WASMixer: Binary Obfuscation for WebAssembly: arXiv:2308.03123[EB/OL]. arXiv. 2023 [2024-12-11]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.03123. arXiv: 2308.03123.

[30] A. Celik, P. Nie, C. J. Rossbach, et al. Design, Implementation, and Application of GPU-based Java Bytecode Interpreters[J]. Proceedings of the ACM on Programming Languages, 2019, 3(OOPSLA): 1-28.

[31] E. D. Berger, S. Stern, J. A. Pizzorno. Triangulating Python Performance Issues with SCALENE[C]. in: 17th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 23). Boston, MA: USENIX Association, 2023: 51-64.

[32] R. Nystrom. Crafting Interpreters[M]. Erscheinungsort nicht ermittelbar: Verlag nicht ermittelbar, 2021.

[33] H. Barbosa, C. Barrett, M. Brain, et al. cvc5: A Versatile and Industrial-Strength SMT Solver[C]. in: D. Fisman, G. Rosu. Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. Cham: Springer International Publishing, 2022: 415-442.

[34] P. Daniel, R. Lopes, N. Santos, et al. Discovering Vulnerabilities in WebAssembly with Code Property Graphs[C]. in: 2019.

[35] Dxo, M. Soos, Z. Paraskevopoulou, et al. Hevm, a Fast Symbolic Execution Framework for EVM Bytecode[G]. in: A. Gurfinkel, V. Ganesh. Computer Aided Verification: vol. 14681. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 453-465.

[36] E. Güler, S. Schumilo, M. Schloegel, et al. Atropos: Effective Fuzzing of Web Applications for Server-Side Vulnerabilities[C]. in: 33rd USENIX Security Symposium (USENIX Security 24). Philadelphia, PA: USENIX Association, 2024: 4765-4782.

[37] Z. Feng, Y. Feng, H. He, et al. A Bytecode-based Integrated Detection and Repair Method for Reentrancy Vulnerabilities in Smart Contracts[J]. IET Blockchain, 2024, 4(3): 235-251.

[38] R. Fang, S. Liu. A Performance Survey on Stack-based and Register-based Virtual Machines[Z]. 2016. arXiv: 1611.00467 [cs].

[39] Z. Feng, Y. Feng, H. He, et al. A Bytecode-based Integrated Detection and Repair Method for Reentrancy Vulnerabilities in Smart Contracts[J]. IET Blockchain, 2024, 4(3): 235-251.

[40] D. P. Friedman, M. Wand. Essentials of Programming Languages[M]. 3rd ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2008.

[41] Leaning Technologies. An Enterprise-Grade C++ Compiler For The Web[Z]. https://leaningtech.com/cheerp/. 2024.

[42] Emscripten Contributors. emscripten[Z]. https://emscripten.org/. 2015.

[43] E. Gershuni, N. Amit, A. Gurfinkel, et al. Simple and Precise Static Analysis of Untrusted Linux Kernel Extensions[C]. in: Proceedings of the 40th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation. Phoenix AZ USA: ACM, 2019: 1069-1084.

[44] Google. ClusterFuzz[Z]. https://google.github.io/clusterfuzz/. 2024.

[45] WebAssembly Community, Rossberg Andreas. WebAssembly Specification[A/OL]. 2024. https://github.com/WebAssembly/spec/.

[46] A. Haas, A. Rossberg, D. L. Schuff, et al. Bringing the Web up to Speed with WebAssembly [C]. in: Proceedings of the 38th ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation. Barcelona Spain: ACM, 2017: 185-200.

[47] D. Park. Halmos, a symbolic testing tool for EVM smart contracts[EB/OL]. 2024. https://github.com/a16z/halmos.

[48] Intel. Intel® 64 and IA-32 Architectures Software Developer's Manual Combined Volumes: 1, 2A, 2B, 2C, 2D, 3A, 3B, 3C, 3D, and 4[A/OL]. 2024. https://cdrdv2.intel.com/v1/dl/getContent/843820?fileName=325462-sdm-vol-1-2abcd-3abcd-4-1.pdf.

[49] Q. Liu, W. Shen, J. Zhou, et al. Interp-Flow Hijacking: Launching Non-control Data Attack via Hijacking eBPF Interpretation Flow[G]. in: J. Garcia-Alfaro, R. Kozik, M. Choraś, et al. Computer Security -- ESORICS 2024: vol. 14984. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 194-214.

[50] Y. Klimiankou. Interpretizer: A Compiler-Independent Conversion of Switch-Based Dispatch into Threaded Code[C]. in: M. Mazzara, J.-M. Bruel, B. Meyer, et al. Software Technology: Methods and Tools. Cham: Springer International Publishing, 2019: 59-72.

[51] D. Evans. Introduction to Computing: Explorations in Language, Logic, and Machines[M]. Version: August 15, 2011. Lexington, Ky., 2011.

[52] Y. Jiang, C. Zhang, B. Ruan, et al. Fuzzing the PHP Interpreter via Dataflow Fusion[Z]. 2024. arXiv: 2410.21713 [cs].

[53] E. Hildenbrandt, M. Saxena, N. Rodrigues, et al. KEVM: A Complete Formal Semantics of the Ethereum Virtual Machine[C]. in: 2018 IEEE 31st Computer Security Foundations Symposium (CSF). 2018: 204-217.

[54] O. Larose, S. Kaleba, H. Burchell, et al. AST vs. Bytecode: Interpreters in the Age of Meta-Compilation[J]. Proceedings of the ACM on Programming Languages, 2023, 7(OOPSLA2): 318-346.

[55] D. Lehmann, J. Kinder, M. Pradel. Everything Old is New Again: Binary Security of WebAssembly[C]. in: 29th USENIX Security Symposium (USENIX Security 20). USENIX Association, 2020: 217-234.

[56] D. Lehmann, M. Pradel. Wasabi: A Framework for Dynamically Analyzing WebAssembly [C]. in: Proceedings of the Twenty-Fourth International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems. Providence RI USA: ACM, 2019: 1045-1058.

[57] M. H. N. Mohamed, X. Wang, B. Ravindran. Understanding the Security of Linux eBPF Subsystem[C]. in: Proceedings of the 14th ACM SIGOPS Asia-Pacific Workshop on Systems. Seoul Republic of Korea: ACM, 2023: 87-92.

[58] D. Liu, Y. Feng, Y. Yan, et al. Towards Understanding Bugs in Python Interpreters[J]. Empirical Software Engineering, 2023, 28(1): 19.

[59] CVE. A vulnerability in the implementation of the Lua interpreter[Z]. https://www.cve.org/CVERecord?id=CVE-2020-3423. 2020.

[60] CVE. Stack overflow in Lua Interpreter 5.1.0 5.4.4[Z]. https://www.cve.org/CVERecord?id=CVE-2021-43519. 2021.

[61] CVE. Use after free in garbage collector and finalizer of Lua interpreter 5.4.0 5.4.3[Z]. https://www.cve.org/CVERecord?id=CVE-2021-44964. 2021.

[62] C. Luo, J. Ming, J. Fu, et al. Reverse Engineering of Obfuscated Lua Bytecode via Interpreter Semantics Testing[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2023, 18: 3891-3905.

[63] A. Niemetz, M. Preiner. Bitwuzla at the SMT-COMP 2020[EB/OL]. 2020. https://arxiv.org/abs/2006.01621. arXiv: 2006.01621 [cs.LO].

[64] N. Popov. Optimizing PHP Bytecode Using Type-Inferred SSA Form[D]. Berlin, Germany: Technische Universität Berlin, 2016.

[65] S. Yuan, F. Besson, J.-P. Talpin. End-to-End Mechanized Proof of a JIT-accelerated eBPF Virtual Machine for IoT[C]. in: A. Gurfinkel, V. Ganesh. Computer Aided Verification. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024: 325-347.

[66] J. Bosamiya, W. S. Lim, B. Parno. Provably-Safe Multilingual Software Sandboxing using WebAssembly[C]. in: 31st USENIX Security Symposium (USENIX Security 22). Boston, MA: USENIX Association, 2022: 1975-1992.

[67] P. P. Ray. An Overview of WebAssembly for IoT: Background, Tools, State-of-the-Art, Challenges, and Future Directions[J]. Future Internet, 2023, 15(8): 275.

[68] L. Rice. Learning eBPF: Programming the Linux Kernel for Enhanced Observability, Networking, and Security[M]. First edition. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2023.

[69] A. Romano, X. Liu, Y. Kwon, et al. An Empirical Study of Bugs in WebAssembly Compilers[C]. in: 2021 36th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE). Melbourne, Australia: IEEE, 2021: 42-54.

[70] D. Weißer, J. Dahse, T. Holz. Security Analysis of PHP Bytecode Protection Mechanisms [G]. in: H. Bos, F. Monrose, G. Blanc. Research in Attacks, Intrusions, and Defenses: vol. 9404. Cham: Springer International Publishing, 2015: 493-514.

[71] H. Chen, C. Cutler, T. Kim, et al. Security Bugs in Embedded Interpreters[C]. in: Proceedings of the 4th Asia-Pacific Workshop on Systems. Singapore Singapore: ACM, 2013: 1-7.

[72] X. Lin, B. Hua, Q. Fan. On the Security of Python Virtual Machines: An Empirical Study [C]. in: 2022 IEEE International Conference on Software Maintenance and Evolution (ICSME). Limassol, Cyprus: IEEE, 2022: 223-234.

[73] M. Seitzer, M. Gruhn, T. Müller. A Bytecode Interpreter for Secure Program Execution in Untrusted Main Memory[G]. in: G. Pernul, P. Y A Ryan, E. Weippl. Computer Security -- ESORICS 2015: vol. 9327. Cham: Springer International Publishing, 2015: 376-395.

[74] C.-A. Staicu, S. Rahaman, Á. Kiss, et al. Bilingual Problems: Studying the Security Risks Incurred by Native Extensions in Scripting Languages[Z]. 2023. arXiv: 2111.11169 [cs].

[75] H. Sun, Y. Xu, J. Liu, et al. Finding Correctness Bugs in eBPF Verifier with Structured and Sanitized Program[C]. in: Proceedings of the Nineteenth European Conference on Computer Systems. Athens Greece: ACM, 2024: 689-703.

[76] 李成扬, 陈夏润, 张汉, 等. 虚拟机软件保护技术综述[J]. 信息安全研究, 2022, 8(7), 675: 675-.

[77] Yixuan Zhang, Mugeng Liu, Haoyu Wang, et al. Research on WebAssembly Runtimes: A Survey[Z]. 2024. arXiv: 2404.12621 [cs].

[78] S. Narayan, C. Disselkoen, D. Moghimi, et al. Swivel: Hardening WebAssembly against Spectre[C]. in: 30th USENIX Security Symposium (USENIX Security 21). USENIX Association, 2021: 1433-1450.

[79] Z. Wang, D. Bu, X. Xuan, et al. An Empirical Study on Bugs in Php[J]. International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering, 2022, 32(06): 845-870.

[80] Z. Wang, D. Bu, A. Sun, et al. An Empirical Study on Bugs in Python Interpreters[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2022, 71(2): 716-734.

[81] M. Waseem, T. Das, A. Ahmad, et al. Issues and Their Causes in WebAssembly Applications: An Empirical Study: arXiv:2311.00646[EB/OL]. arXiv. 2024 [2024-11-28]. http://doi.org/10.48550/arXiv.2311.00646. arXiv: 2311.00646.

[82] CVE. Heap Overflow Vulnerability in wasm-micro-runtime[Z]. https://www.cve.org/CVERecord?id=CVE-2023-48105. 2023.

[83] CVE. Out-of-bound memory read vulnerability in wasm-micro-runtime[Z]. https://www.cve.org/CVERecord?id=CVE-2024-34250. 2024.

[84] CVE. Heap buffer overflow vulnerability in wasm-micro-runtime[Z]. https://www.cve.org/CVERecord?id=CVE-2024-34251. 2024.

[85] 庄骏杰, 胡霜, 华保健, 等. WebAssembly安全研究综述[J]. 计算机研究与发展, 2024, 61(8): 1-27.

[86] Yutian Yan, Tengfei Tu, Lijian Zhao, et al. Understanding the Performance of Webassembly Applications[C]. in: Proceedings of the 21st ACM Internet Measurement Conference. Virtual Event: ACM, 2021: 533-549.

[87] L. De Moura, N. Bjørner. Z3: An Efficient SMT Solver[G]. in: D. Hutchison, T. Kanade, J. Kittler, et al. Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems: vol. 4963. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008: 337-340.

[88] Yixuan Zhang, Shangtong Cao, Haoyu Wang, et al. Characterizing and Detecting WebAssembly Runtime Bugs[J]. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, 2024, 33(2): 1-29.

[89] Q. Zhang, L. Xu, B. Xu. RegCPython: A Register-based Python Interpreter for Better Performance[J]. ACM Transactions on Architecture and Code Optimization, 2023, 20(1): 1-25.

致 谢

时光荏苒岁月如梭，转眼自己在HNU的本科生涯就此画上了句号。回想过往的憧憬，愈发发觉有涯的人生实在无法穷尽渴望研习讨论的知识，愈发感受到愿景落空后的久萦心间的遗憾。我深深地感谢我的导师xxx，他最初向我提出了这个问题，他凭着非凡的直觉，坚持认为代数方法将是富有成果的。 I owe a deep dept to my advisor Professor xxx, who originally suggested the topic to me and who, with remarkable intuition, insisted that the algebraic approach would be fruitful.

附录 A

公式推导如 (A.1) 式所示。

$$\begin{aligned}\int \frac{x+\sin x}{1+\cos x}\mathrm{d}x &= \int \frac{x}{2\cos^2\frac{x}{2}}+\tan\frac{x}{2}\mathrm{d}x \\ &= \int x\mathrm{d}\tan\frac{x}{2}+\tan\frac{x}{2}\mathrm{d}x \\ &= \frac{x}{2}\tan\frac{x}{2}-\int\tan\frac{x}{2}\mathrm{d}x+\int\tan\frac{x}{2}\mathrm{d}x \\ &= x\tan\frac{x}{2}+C\end{aligned} \tag{A.1}$$

所形成的交换图如图 A.1，图 A.2，图 A.3 和图 A.4 所示。

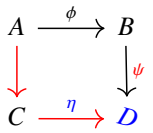
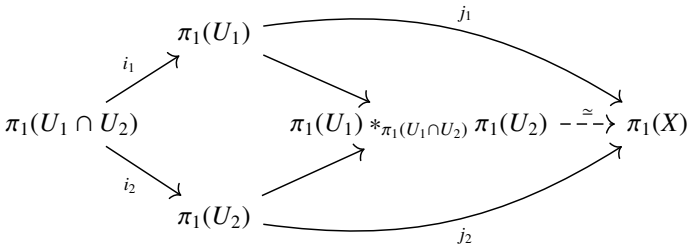
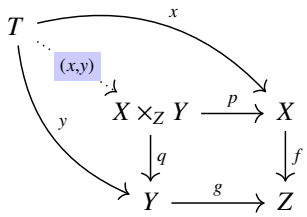


图 A.1　交换图例一



注：关系与图A.1类似，但不多.

图 A.2　交换图例二



注：关系与图A.1，图A.2类似，但不多.

图 A.3　交换图例三

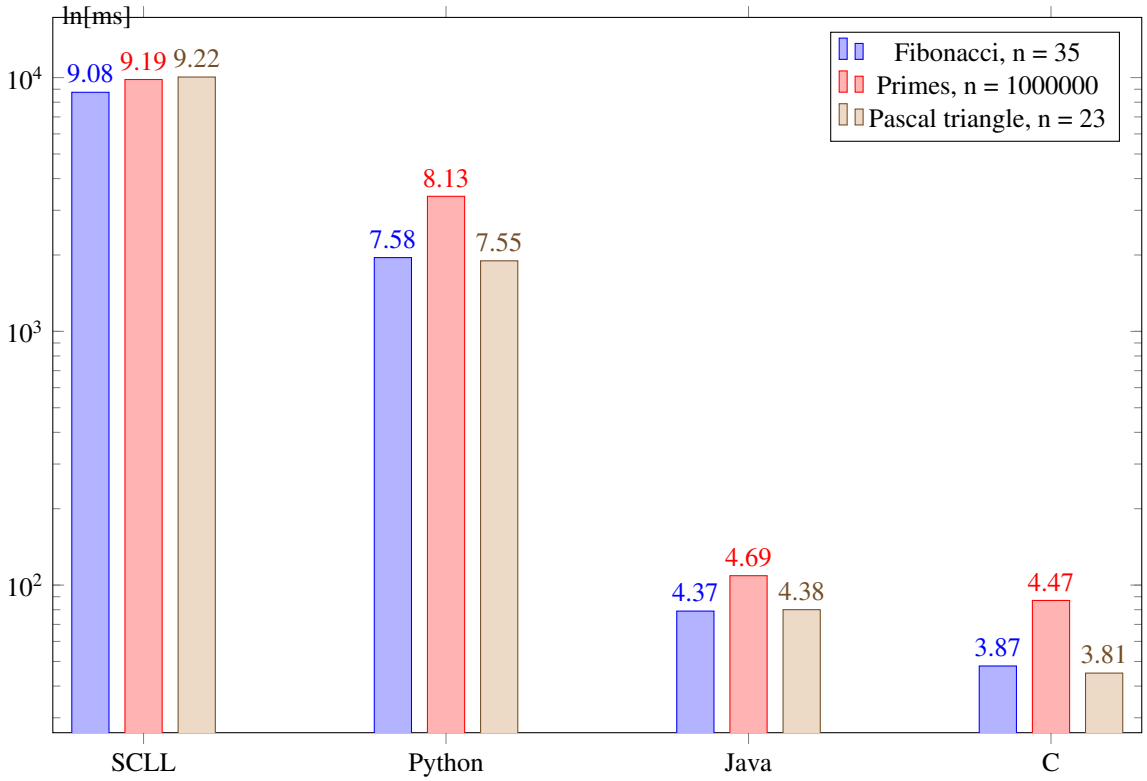


图 A.4　性能统计图表

附录 B

所用图片为图 B.1。

(a) 测试代码一　　(b) 测试代码二

图 B.1　所用代码集

所用表格为表 B.1 和表 B.2。

表 B.1 数学字体对照表

mathrm		mathbf		mathit		mathsf		mathtt		mathcal		mathbb		mathfrak		mathscr	
Aa	Nn	**Aa**	**Nn**	*Aa*	*Nn*	Aa	Nn	Aa	Nn	$\mathcal{A}a$	$\mathcal{N}n$	$\mathbb{A}$	$\mathbb{N}$	$\mathfrak{A}\mathfrak{a}$	$\mathfrak{N}\mathfrak{n}$	$\mathscr{A}a$	$\mathscr{N}n$
Bb	Oo	**Bb**	**Oo**	*Bb*	*Oo*	Bb	Oo	Bb	Oo	$\mathcal{B}b$	$\mathcal{O}o$	$\mathbb{B}$	$\mathbb{O}$	$\mathfrak{B}\mathfrak{b}$	$\mathfrak{O}\mathfrak{o}$	$\mathscr{B}b$	$\mathscr{O}o$
Cc	Pp	**Cc**	**Pp**	*Cc*	*Pp*	Cc	Pp	Cc	Pp	$\mathcal{C}c$	$\mathcal{P}p$	$\mathbb{C}$	$\mathbb{P}$	$\mathfrak{C}\mathfrak{c}$	$\mathfrak{P}\mathfrak{p}$	$\mathscr{C}c$	$\mathscr{P}p$
Dd	Qq	**Dd**	**Qq**	*Dd*	*Qq*	Dd	Qq	Dd	Qq	$\mathcal{D}d$	$\mathcal{Q}q$	$\mathbb{D}$	$\mathbb{Q}$	$\mathfrak{D}\mathfrak{d}$	$\mathfrak{Q}\mathfrak{q}$	$\mathscr{D}d$	$\mathscr{Q}q$
Ee	Rr	**Ee**	**Rr**	*Ee*	*Rr*	Ee	Rr	Ee	Rr	$\mathcal{E}e$	$\mathcal{R}r$	$\mathbb{E}$	$\mathbb{R}$	$\mathfrak{E}\mathfrak{e}$	$\mathfrak{R}\mathfrak{r}$	$\mathscr{E}e$	$\mathscr{R}r$
Ff	Ss	**Ff**	**Ss**	*Ff*	*Ss*	Ff	Ss	Ff	Ss	$\mathcal{F}f$	$\mathcal{S}s$	$\mathbb{F}$	$\mathbb{S}$	$\mathfrak{F}\mathfrak{f}$	$\mathfrak{S}\mathfrak{s}$	$\mathscr{F}f$	$\mathscr{S}s$
Gg	Tt	**Gg**	**Tt**	*Gg*	*Tt*	Gg	Tt	Gg	Tt	$\mathcal{G}g$	$\mathcal{T}t$	$\mathbb{G}$	$\mathbb{T}$	$\mathfrak{G}\mathfrak{g}$	$\mathfrak{T}\mathfrak{t}$	$\mathscr{G}g$	$\mathscr{T}t$
Hh	Uu	**Hh**	**Uu**	*Hh*	*Uu*	Hh	Uu	Hh	Uu	$\mathcal{H}h$	$\mathcal{U}u$	$\mathbb{H}$	$\mathbb{U}$	$\mathfrak{H}\mathfrak{h}$	$\mathfrak{U}\mathfrak{u}$	$\mathscr{H}h$	$\mathscr{U}u$
Ii	Vv	**Ii**	**Vv**	*Ii*	*Vv*	Ii	Vv	Ii	Vv	$\mathcal{I}i$	$\mathcal{V}v$	$\mathbb{I}$	$\mathbb{V}$	$\mathfrak{I}\mathfrak{i}$	$\mathfrak{V}\mathfrak{v}$	$\mathscr{I}i$	$\mathscr{V}v$
Jj	Ww	**Jj**	**Ww**	*Jj*	*Ww*	Jj	Ww	Jj	Ww	$\mathcal{J}j$	$\mathcal{W}w$	$\mathbb{J}$	$\mathbb{W}$	$\mathfrak{J}\mathfrak{j}$	$\mathfrak{W}\mathfrak{w}$	$\mathscr{J}j$	$\mathscr{W}w$
Kk	Xx	**Kk**	**Xx**	*Kk*	*Xx*	Kk	Xx	Kk	Xx	$\mathcal{K}k$	$\mathcal{X}x$	$\mathbb{K}$	$\mathbb{X}$	$\mathfrak{K}\mathfrak{k}$	$\mathfrak{X}\mathfrak{x}$	$\mathscr{K}k$	$\mathscr{X}x$
Ll	Yy	**Ll**	**Yy**	*Ll*	*Yy*	Ll	Yy	Ll	Yy	$\mathcal{L}l$	$\mathcal{Y}y$	$\mathbb{L}$	$\mathbb{Y}$	$\mathfrak{L}\mathfrak{l}$	$\mathfrak{Y}\mathfrak{y}$	$\mathscr{L}\ell$	$\mathscr{Y}y$
Mm	Zz	**Mm**	**Zz**	*Mm*	*Zz*	Mm	Zz	Mm	Zz	$\mathcal{M}m$	$\mathcal{Z}z$	$\mathbb{M}$	$\mathbb{Z}$	$\mathfrak{M}\mathfrak{m}$	$\mathfrak{Z}\mathfrak{z}$	$\mathscr{M}m$	$\mathscr{Z}z$

注：此数据仅为示例，实际数据可能有所不同.

表 B.2 各组分 $\lg(B_i)$ 值

序号	T=1500K		T=2000K	
	组分	$\lg B_i$	组分	$\lg B_i$
1	O_2^+	5.26	HO_2	6.43
2	HO_2	5.26	O_2^+	6.42
3	H_2O^+	4.76	H_2O^+	6.18
4	N_2^+	3.97	H	6.12
5	H	3.54	H_2^+	6.04
6	OH	3.29	OH	5.91
7	CO^+	3.26	O	5.59
8	H_2^+	2.54	N_2^+	4.87
9	O	2.30	CO^+	3.98
10	H_2O_2	1.62	CO_2^+	3.76
11	CO_2^+	1.40	H_2O_2	3.09
12	HCO^*	-0.47	HCO^*	0.24
13	N^+	-4.85	N^+	-2.81
14	CH_2O^+	-6.91	CH_2O^*	-6.13
15	NO^+	-16.60	NO^+	-11.76

注：“+”表示重要成分，“*”表示冗余组分.