

移动 Web 浏览性能的度量分析

辛泽西¹ 马郢^{1, 2} 刘譞哲¹

(北京大学高可信软件技术教育部重点实验室 北京 100871)¹

(清华大学软件学院 北京 100084)²

摘要 Web 浏览是互联网用户最经常使用的功能之一, Web 浏览性能是影响移动用户体验的重要因素。相对于传统 PC 设备的 Web 浏览,在移动设备上,用户对 Web 浏览的性能要求更加综合,关注包括加载时间、流量使用和电量消耗等指标。随着 Web 技术的发展,Web 页面越来越复杂,新的网络传输协议不断涌现,移动浏览器越来越多样,加之移动设备网络环境的动态性和不确定性,对移动 Web 浏览的性能造成了复杂的影响。本文从移动浏览器、网络协议和网络环境这三个角度出发,分析移动 Web 浏览性能在不同环境下的差异并探究其原因。本文首先选取一定数量的代表性移动网页,搭建测试平台记录网页数据,之后在各种不同的网络环境、网络协议、移动浏览器的组合条件下访问记录的网页,进而分析比较加载时间、Speed Index 等性能指标的差异,总结可能影响 Web 浏览性能的原因,并且为浏览器厂商、Web 开发人员以及用户提供优化浏览体验的建议。

关键词 移动 Web 浏览, 性能, 度量分析

中图法分类号 (细化到 3 位数字) 文献标识码 A DOI (投稿时不提供 DOI 号)

A Measurement Study on the Performance of Mobile Web Browsing

XIN Ze-xi¹ MA Yun^{1,2} LIU Xuan-zhe¹

(Key Lab of High Confidence Software Technologies (Peking University), Ministry of Education, Beijing 100871, China)¹

(School of Software, Tsinghua University, Beijing 100084, China)²

Abstract Web browsing is one of the most frequently used features of mobile users and the performance of Web browsing is an important factor affecting mobile user experience. Compared with Web browsing on PC, users concern not only the page load time, but also the consumption of traffic, power consumption and other issues when browsing through the mobile Web. With the development of Web technology, Web pages are becoming more and more complicated, new network protocols are emerging, and mobile browsers are becoming more and more diverse. Meanwhile, the dynamics and uncertainties of the mobile devices' network environment have a very complex impact on the performance of mobile Web browsing. This paper measures the performance differences of mobile Web browsing from three perspectives: network protocols, mobile browsers and network environments, and explores the causes to the differences. We first select some representative mobile Web pages from Alexa, build a measurement platform for data collection, and then compare several performance metrics in a variety of different network environments, network protocols and mobile browsers. Finally, we dig out the root causes leading to the performance differences and provide suggestions for browser vendors, Web developers and users to improve the browsing experience.

Keywords Mobile Web browsing, Performance, Measurement study

1 引言

发布的第 39 次《中国互联网络发展状况统计报

根据中国互联网络信息中心于 2017 年 1 月 告》^[1], 截至 2016 年 12 月, 我国手机网民规模

到稿日期: 返修日期: 本文受国家高技术研究发展计划(863 计划)(2015AA01A202), 国家自然科学基金青年-面上连续资助项目(61370020), 国家自然科学基金创新研究群体项目(61421091)资助。

辛泽西(1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数据分析和移动计算; 马郢(1989-), 男, 博士, CCF 会员, 主要研究方向为移动计算、Web 和服务计算; 刘譞哲(1980-), 男, 博士, 副教授, CCF 会员, 主要研究领域为移动计算、Web 技术和大数据, E-mail: liuxuanzhe@pku.edu.cn。

达 6.95 亿,较 2015 年底增加 7550 万人。网民中使用手机上网人群的占比由 2015 年的 90.1%提升至 95.1%,提升 5 个百分点,而且这个比例在不断攀升。由此可见,手机已经成为第一大上网终端。

移动 Web 浏览是移动用户的重要行为之一。影响 Web 浏览性能的因素有很多:在网络环境方面,4G 网和 WiFi 已经普及;在网络传输协议方面,除了最早的 HTTP 1.1^[2]协议外,近年来还出现了 SPDY^[3]和 QUIC^[4]等新型网络传输协议;在移动 Web 浏览器方面,除了像 Chrome、Firefox、Opera 和 Safari 这样的主流浏览器之外,各大应用商店里还有上百个中小型厂商开发的浏览器。移动 Web 用户往往非常关心在浏览网页时的体验。同时,浏览器厂商也希望开发出性能更好的浏览器来吸引用户使用自己的产品。因此,通过分析影响移动 Web 浏览性能的不同因素,并找出在不同环境下获得最佳浏览性能的组合,浏览器厂商就可以基于此来有针对性地优化自己的产品,Web 开发人员可以开发出可被更快加载的网页,从而为用户提升浏览体验。

基于上述需求,本文对移动 Web 浏览的性能开展度量分析:首先从 Alexa^[5]上选取一些有代表性的移动网页作为数据集;然后搭建了分析实验平台,从网络环境、网络协议和移动 Web 浏览器三个方面、选取 Page Load Time 和 Speed Index^[6]作为浏览性能的评估指标来进行实验;最后分析造成浏览性能差异的原因。

本文的主要贡献包括:

- 本文搭建了一个浏览性能的测量平台,设计并进行了浏览性能测量实验;
- 本文探究了网络环境、网络协议和移动 Web 浏览器对浏览性能的影响,发现了网页的特征会影响浏览器加载网页的速度,以及在不同网络环境下没有始终保证最优移动 Web 浏览体验的网络协议;
- 本文为浏览器厂商、Web 开发人员以及用户提供了一些优化浏览体验的建议。

本文后续部分的结构如下:第 2 章介绍相关工作;第 3 章介绍本文工作所用的实验方法、数据集以及测量实验平台;第 4 章探究浏览器、网络协议和网络环境对浏览性能的影响,展示在不同的影响指标下,各个评估指标的测量结果并对结果进行分析;第 5 章讨论本文的发现和结论对浏览器厂商、Web 开发人员以及用户的启示以及实验的局限性;第 6 章对全文工作进行总结。

2 相关工作

移动 Web 性能的分析得到研究者的广泛关注。Junxian Huang^[7]等人测量了移动网页的浏览性能。Yun Ma^{[8][9]}等人设计了主动式度量实验分析了移动 Web 缓存的性能,发现缓存的理想性能与实际性能之间有较大差异。Zhen Wang^[10]等人使用 WebKit 代码库、两代 Android 智能手机和 25 个智能手机用户在三个月内访问的网页,对智能手机上的 Web 浏览器进行了一项测量研究。他们发现资源负载对浏览器延迟的影响最大,而计算的优化只会使现有网页的性能提升。Niranjan Balasubramanian^[11]等人进行了 3G, GSM 和 WiFi 三种被广泛普及的移动网络技术的能耗特征的测量研究。Feng Qian^[12]等人首先综合考察了移动网页浏览的资源使用情况,他们重点关注两种重要的资源类型:带宽和电量。

此外,也有一些研究小组对各个网络协议的性能进行了研究。Gaetano Carlucci^[13]等人通过研究发现,在丢包率较高的情况下,QUIC 优于 SPDY。但是如果启用了 FEC 模块的话,QUIC 的性能会下降。Somak R. Das^[14]发现 QUIC 比之前的协议在低带宽和高延迟链路上快 10-60%。Xiao Sophia Wang^[15]等人对 SPDY 协议下的 Page Load Time 进行系统研究,并将其与 HTTP 进行比较。与 HTTP 相比,SPDY 增加了一些与速度相关的功能,可以大大减少 Page Load Time。但是在高丢包率的情况下,SPDY 的性能并不是很出色。他们还发现,请求优先级对减少页面加载时间没有什么帮助,而服务器推送发挥了很大的作用。

然而, 现有工作并没有考虑移动浏览器之间的性能差异, 在进行协议性能的分析时, 选取的网页数量也较少, 而且缺乏代表性。

3 数据收集和实验平台

为了更加全面地分析移动 Web 浏览性能, 本文从 Alexa 选取代表性网页数据集, 并且从浏览器、网络协议和网络环境三个方面开展研究。本章首先介绍数据集的选取方法, 然后定义性能的度量指标, 最后设计了一个浏览性能测量平台。

3.1 数据收集

在网页收集方面, 本文从 Alexa 排名前 1000 名的流行网站主页中选择要研究的网页。本文按照以下规则对网页数据进行筛选:

- 删掉无法访问的网页。由于服务器内部错误或网络问题等原因, 某些网页无法访问。这种网页直接删掉。例如: adexchangeprediction.com
- 重复的网页只保留一个。有些网页虽然域名不同, 但是内容相同。例如: google.co.jp 和 google.co.uk。本文只从所有内容相同的重复网页中选取一个。
- 本文只选取各个网站的主页。因为与其他的页面相比, 首页由于内容更加丰富, 也相对比较复杂, 所以更具有代表性。

经过筛选之后, 有效的网页数为 504 个。

3.2 评价指标定义

本文选取了 Page Load Time 和 Speed Index 作为浏览性能的评估指标来进行实验。Page Load Time 描述了网页加载的速度, Speed Index 描述了网页中可见资源的加载速度。这两个指标都会对用户的浏览体验产生影响, 而可见资源的加载速度会更加直接地影响用户的浏览体验, 故本文使用 Speed Index 来对 Page Load Time 进行补充。下面简要介绍一下这两个评价指标。

(1) Page Load Time

Page Load Time 描述了网页加载的速度, 这个值越小表示加载速度越快, 其计算方式为:

$$\text{Page Load Time} = \text{loadEventEnd} - \text{fetchStart}$$

其中 loadEventEnd 代表以毫秒计的网页加载结束的时间, fetchStart 代表以毫秒计的浏览器发出 HTTP 请求的时间。

(2) Speed Index

Speed Index 描述了网页中可见资源的加载速度, 这个值越小表示加载可见资源的速度越快, 其计算公式为:

$$\text{Speed Index} = \int_0^{\text{end}} (1 - VC)$$

其中 end 代表以毫秒计的网页加载时间, VC 代表用百分比表示的网页加载的完成程度。

分析完成程度的方法为通过网页加载视频的截图来进行分析。首先为图像中的颜色画出直方图 (红色, 绿色和蓝色各一个), 然后查看页面上颜色的总体分布。计算起始直方图 (第一个视频帧) 和结束直方图 (最后一个视频帧) 之间的差异, 并将该差异作为基准。将视频中的每个帧的直方图与第一个帧的直方图之间的差异与基准进行比较, 以确定视频帧的完成程度。

为了更加直观地理解 Speed Index 的计算方式, 本文画了一个描述 Speed Index 计算方法的示意图。如图 1 所示, 横轴为加载时间, 纵轴是在某一时刻网页加载的完成程度。染色部分面积即为 Speed Index。

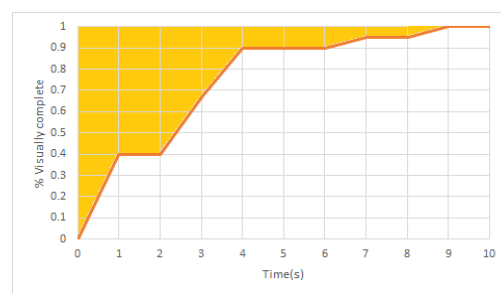


图 1 Speed Index 计算示意图

3.3 实验平台

为了在不同条件下测量 Web 浏览性能, 本文设计了一个控制变量实验来访问网页, 记录网页数据, 模拟实际的互联网请求并获取网页加载性能数据。实验平台的架构如图 2 所示。

首先使用 Mahimahi^[16]分别通过 Chromium 和 Firefox 对筛选所得的 504 个网页依次进行访问,

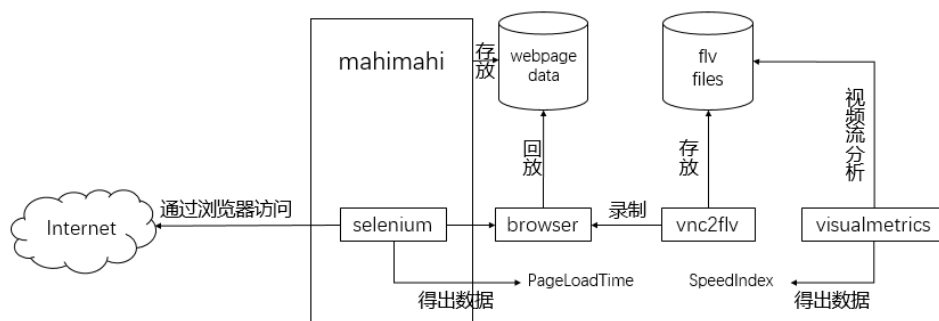


图 2 实验平台架构

并将结果存放到本地。在网页数据记录结束后，使用 Mahimahi 的回放功能在 Chromium 和 Firefox 中进行多轮网页回放。在回放的过程中，为了能够控制浏览器自动加载页面并计算 Page Load Time，本文使用了 Selenium 来控制浏览器。在脚本控制浏览器进行访问的同时，使用 vnc2flv 进行录屏，并使用 Visualmetrics 对视频进行分析，以得出 Speed Index 数据。分别对获得到的 Page Load Time 数据、Speed Index 数据和收集到的网页数据进行处理即可分析网页和移动 Web 浏览器对浏览性能的影响。

接下来，使用 Mahimahi 的回放功能在 Chromium 中进行多轮网页回放，并获得 Page Load Time 数据。在每一轮回放之前，要配置好 Mahimahi 工具里的网络环境（网络延迟、带宽、丢包率）和网络协议（HTTP1.1、SPDY、QUIC）。分别对每一轮回放获得的数据进行处理即可分析网络环境和网络协议对浏览性能的影响。Mahimahi 的开发者验证了该工具在模拟访问时所产生的额外延迟非常小，因此不会对实验结果造成影响。

4 实验结果及分析

在对多个指标进行分析时，要采取控制变量的方法对各个指标的影响进行分析。本文控制变量的方法为：首先控制网络协议和网络环境相同，在此条件下研究浏览器对浏览性能的影响；然后控制使用的浏览器相同，在此条件下研究网络环

境和网络协议对浏览性能的影响。接下来本文分别介绍各个控制变量实验的实验结果并进行分析。

4.1 浏览器对浏览性能的影响

4.1.1 浏览器之间加载速度的差异

使用 Mahimahi 控制 Firefox 和 Chromium 浏览器对记录下的网页进行多次回放，并使用 Selenium 获取 Page Load Time (PLT) 数据。使用得到的数据画出累积分布函数图像 (CDF) 并计算中位数和平均值，如表 1 和图 3 所示。结果表明，Firefox 的加载时间比 Chromium 的要长。

表 1 两个浏览器上 PLT 的中位数和平均数

	中位数/(ms)	平均数/(ms)
Firefox	3039	3695.741
Chromium	2398	3146.883
差值	350	548.858

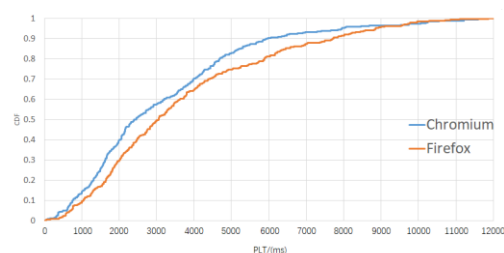


图 3 Firefox 和 Chromium 的 PLT 分布

接下来本文研究了各个浏览器加载可见资源的差异，结果如表 2 和图 4 所示。结果表明，在表 2 两个浏览器上 Speed Index 的中位数和平均数

	中位数	平均数
Firefox	834.5	964.6235
Chromium	648.5	815.6481
差值	114.5	148.9754

加载可见资源方面，Chromium 也比 Firefox 快，

但是差别不像 PLT 那样明显。

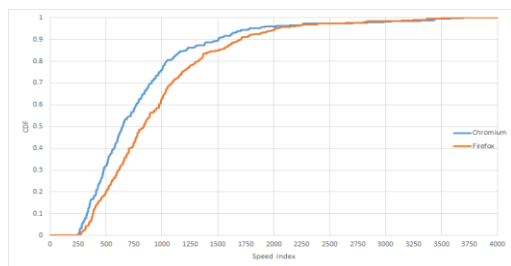


图4 Firefox 和 Chromium 的 Speed Index 分布

4.1.2 不同浏览器上网页加载内容的差异

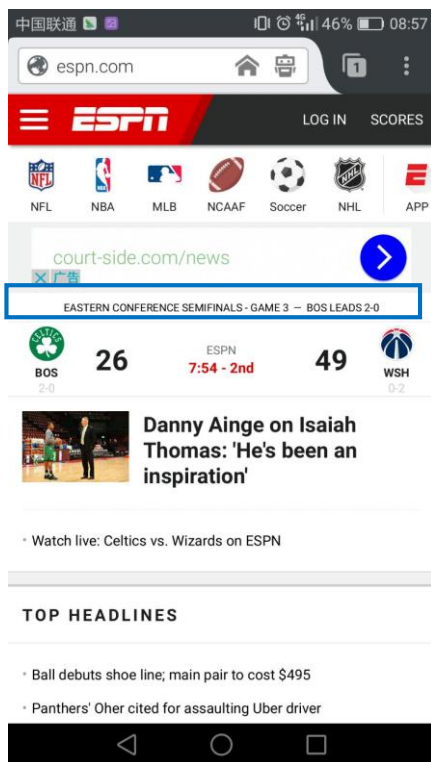
本文假设不同的浏览器加载的网页内容不同导致了性能的差异。事实表明, 同一网页在不同的浏览器上加载的内容确实有所不同。下面举一个例子加以说明。

图5展示了同时在两个浏览器上访问的 ESPN 网站首页的截图。显然, 加载结果有明显的不同。比如 Firefox 没有加载 Chrome 中粗方框中的部分。另外, 两个浏览器中细方框中的文字大小也有区别。接下来本文对在不同浏览器上加载内容的差异进行了研究。

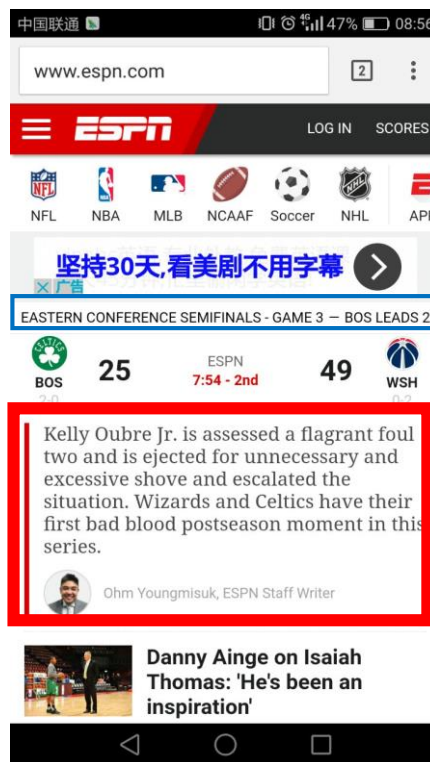
本文首先选择了一些可能与浏览性能相关的影响因素, 并用一些指标来描述这些影响因素。下一节会分析这些因素对浏览性能的影响, 并说明导致不同浏览器上浏览性能有差异的主要因素。表3展示了本文选取的各个影响因素及指标。

网页的资源规模包括资源总数和资源总量。网页的资源包括渲染过后的所有的 HTML、JavaScript、CSS、图片等等。在不同浏览器中的资源可能很不一样。浏览器在 HTTP 请求中的 user-agent 域具有唯一标识符, 以标识其类型和版本。因此, 服务器可能会向不同的浏览器返回不同的资源, 这样就导致了资源的大小和数量有所不同。资源规模的不同往往导致不同浏览器的加载时间不同, 因为更大量的资源往往消耗更多的时间。此外, 浏览器可能有自己的解析和呈现网页的策略。例如, 预取策略可能适用于具有大量资源的网页, 因为它可以节省 HTTP 连接的时间。

MIME 类型的资源的分布表示在网页中 HTML、JavaScript、CSS、图片以及其他资源的分布。



(a)Firefox 上的 www.espn.com



(b)Chrome 上的 www.espn.com

图5 Firefox 和 Chrome 上 www.espn.com 首页的区别

表 3 选取的浏览性能影响因素及指标

影响因素	指标	解释
资源的规模	资源数量	网页中资源的总数
	资源大小	网页中资源的总大小（按字节计数）
MIME 类型的资源的分布	JavaScript 的比例	网页中 JavaScript 资源的比例
	HTML 的比例	网页中 HTML 资源的比例
	样式表的比例	网页中 CSS 资源的比例
	图片的比例	网页中图片资源的比例
	JSON 的比例	网页中 JSON 资源的比例
对第三方网页的依赖	第三方资源的比例	网页中第三方资源的比例
	浏览器提供的资源的比例	网页中由浏览器提供的第三方资源的比例
HTTPS 保护机制	HTTPS 的比例	网页中使用 HTTPS 协议的资源的比例

由于浏览器处理这些资源的能力可能有所不同，所以这也会成为影响浏览性能的因素。例如，具有更快的 JavaScript 引擎的浏览器可能在加载 JavaScript 资源比例较高的网页时花费更少的时间。

对第三方资源的依赖性也会影响加载时间。本文通过 URL 来判定一个资源是否来自第三方网站。如果 URL 中含有网页域名中的关键词，那么就判定它是本网页中的普通资源，否则就判定它是由第三方提供的资源。本文更关注由浏览器厂商提供的资源。浏览器可能会对第三方资源有不同的偏好设置，甚至会出于安全性的原因拦截某些域名。因此，第三方资源也会成为浏览性能的影响因素之一。

HTTPS 安全机制为用户提供了额外的安全保障。然而，HTTPS 需要通信的双向加密，不同浏览器的处理能力可能会有所不同。因此，HTTPS 资源的数量也是本文需要考虑的内容。

接下来使用上述指标来比较网页的资源。首先使用 p 值为 0.05 的曼-惠特尼 U 检验^[17]分析两个浏览器之间差异的统计学意义。图 6 列出了 U 检验后在每个指标下有显著差异的网页的百分比。

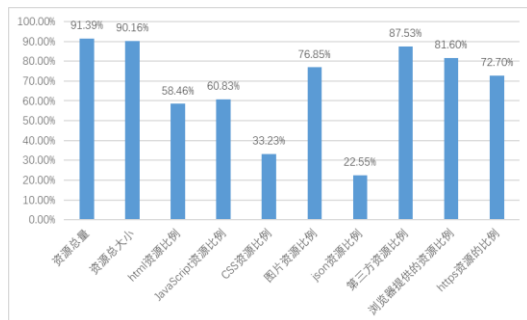


图 6 在各个指标下两个浏览器中有显著差异的网页占比

可以看出，在大多数指标下，不同浏览器的差异非常大。比如，90%的网站资源规模不一样。

为了更好地了解浏览器之间的差异，本文将所有资源分为 3 类：被所有浏览器共享的资源 (ALL)、仅被 Chromium 获取的资源 (CR)、仅被 Firefox 获取的资源 (FF)。接下来对这 3 个类型的资源进行比较，计算每一种资源的占比。

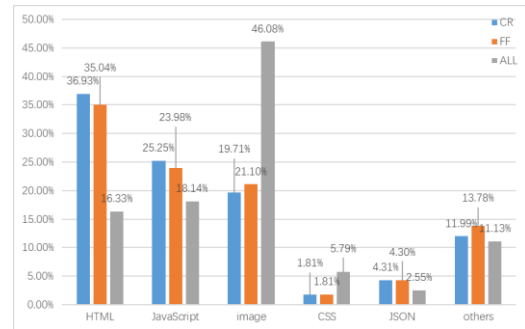


图 7 在不同资源集中 MIME 类型资源的占比

从图 7 中可以看出，在被这两种浏览器共同获取的资源中，占比较高的是图像资源，而 HTML 资源的占比较低。仅被一个浏览器所获取的资源中，占比较高的是 HTML 资源，而图像资源的占比较低。结果表明，在不同浏览器中，HTML 的差异较大，而图像的差异较小。

4.1.3 在 Chromium 和 Firefox 上加载显著较快的网页的特征

根据多次回放所得到的多组 Page Load Time 数据可以判断一个网站在一个浏览器上的加载时间是否显著比在另一个上的更少。通过 p 值为 0.05 的曼-惠特尼 U 检验分析两个浏览器之间 Page Load Time 差异的统计学意义。结果表明有 35.84% 的网页在 Chromium 上加载显著更快，有 30.93% 的网页在 Firefox 上加载显著更快。

接下来本文研究了在 Chromium 和 Firefox 两个浏览器上分别加载显著较快的网页的特征。

首先定义如下两个集合：

CR: 在 Chromium 上加载显著较快的网页集合。

FF: 在 Firefox 上加载显著较快的网页集合。

前文定义了一些描述网页内容的指标。接下来，本文将分析在 Chromium 和 Firefox 浏览器中加载较快的网页在上述指标下的特征。分析的方法为，对 CR 和 CR 的补集（去掉在 Chromium 上加载显著较快的网页后的集合）、FF 和 FF 的补集（去掉在 Firefox 上加载显著较快的网页后的集合）在以上所有指标中进行对比。首先分别对两个集合进行 p 值为 0.05 的曼-惠特尼 U 检验。为了显示差别的大小，本文计算了 Cliffs Delta^[18]（记为 d ）。Cliffs Delta 用于描述一组值比另一组值大的频繁程度， d 的值越大，说明在统计意义上差别更为显著。这里定义当 $d \geq 0.15$ 时，差别非常显著；当 $0.1 \leq d \leq 0.15$ 时，差别较为显著；当 $d < 0.1$ 时，差别较不显著。统计结果如表 4 所示。

表 4 在各个指标下各个集合的统计结果

指标	CR		FF	
	相关性	显著程度	相关性	显著程度
资源数量	-	0.096	+	0.106
资源大小	-	0.075	+	0.097
JS 占比	+	0.176	+	0.004
HTML 占比	+	0.155	-	0.107
图片占比	-	0.172	+	0.118
CSS 占比	+	0.026	-	0.014
JSON 占比	+	0.011	+	0.034
第三方资源	+	0.070	-	0.088
HTTPS 占比	+	0.099	-	0.128

从表 4 中可以发现，在 Chromium 上加载显著更快的网页中，JavaScript 和 HTML 的占比较高，而图片的占比较低；在 Firefox 上加载显著更快的网页中，图片的占比较高，而 HTML 和 HTTPS 资源的占比较低。CSS 和 JSON 对不同浏览器上的加载速度影响不大。

由此可以得出以下结论：Chromium 对渲染和执行 JavaScript 的效率进行了优化，并且善

于渲染 DOM。而 Firefox 在处理大量的图片方面性能较好。

4.1.4 小结与启示

通过以上实验结果得出的结论如下：

- 不同网页在不同浏览器上的加载结果有明显不同。大约 90% 的网页在 Chromium 和 Firefox 中的加载结果不同。因此，为了获得更高的浏览质量，终端用户可以为不同的网页选择不同的浏览器。
- 许多网页（>60%）中的 HTML、图片和 JavaScript 资源的占比不同。而 CSS 和 JSON 资源占比不同的网页较少（<30%）。由此可知，网页的布局和数据在不同浏览器中更加稳定，而结构和媒体对象可能会有所不同。
- 在两个浏览器共同占有的资源中，图片的占比较高，而 HTML 资源的占比较低。只被一个浏览器获取的资源中，HTML 资源的占比较高，图片的占比较低。由此可知，在网页的所有资源中，HTML 资源在不同的浏览器中较为不同，而图片资源较为类似。在不同的浏览器上尽管网页的外观较为相似，但是对结构的定义在浏览器中会有所不同。
- 具有更高 JavaScript 和 HTML 资源占比以及更低图片占比的网页在 Chromium 上的加载时间更短。具有更高图片占比的网页在 Firefox 上的加载时间更短。因此，网页开发者应该最大限度地利用各个浏览器的优点，并尽量避开它们的缺点。用户也可以使用不同的浏览器来浏览不同类型的网页。
- 某些类型的 MIME 类型资源，特别是 CSS 和 JSON，对浏览器的加载时间并没有太大的影响。这说明不同浏览器上布局逻辑的不同不会影响加载时间，因此，开发人员更应该想办法确保网页在不同浏览器上的外观一致。

4.2 网络环境和网络协议对浏览性能的影响

4.2.1 实验方法

本节在不同的网络延迟（RTT）、丢包率（Loss）和带宽（BW）下，测量各个协议加载网

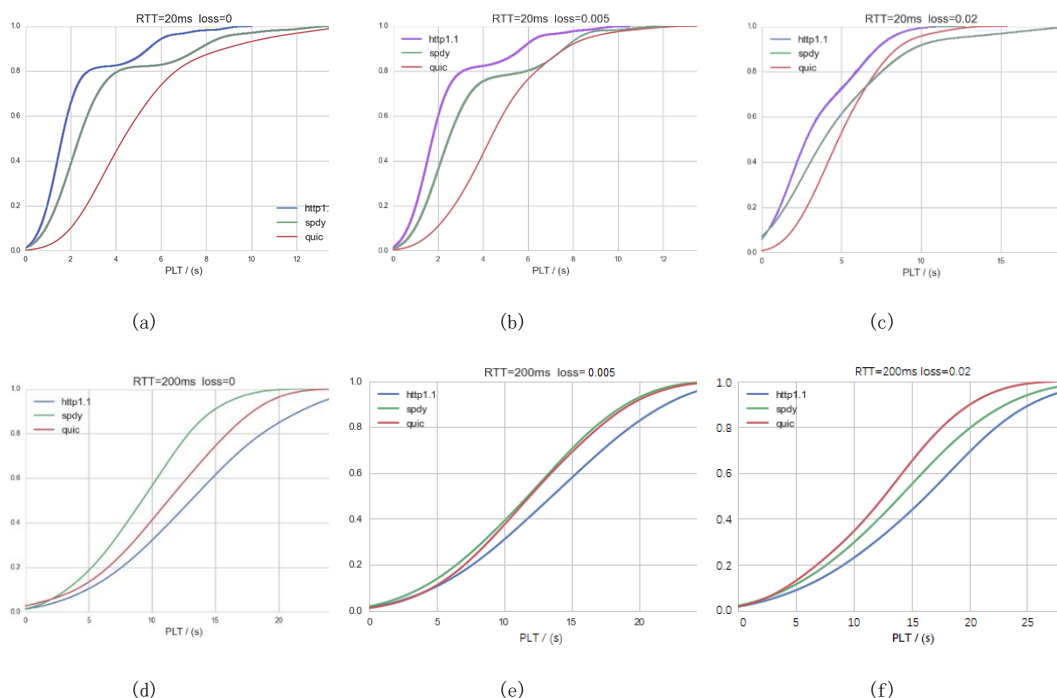


图 8 不同网络环境下不同协议的 Page Load Time 的分布

页的 Page Load Time。本文在上述三个因素下分别选取了几个固定值来进行实验。选取的参数数值如表 5 所示。

表 5 影响浏览性能的因素

影响因素	数值	对数值较大的定义
页面大小		>100KB
网络延迟	20ms, 200ms	>100ms
丢包率	0, 0.005, 0.02	>0.01
带宽	5Mbps, 10Mbps	>10Mbps

接下来在不同的数值组合下进行多轮测量实验。在每一轮实验中，使用 Mahimahi 对网页进行回放。在回放前，为了能够使各个网页能够在不同的网络协议下加载，要预先在 Mahimahi 上配置好相关协议。在做 HTTP1.1 和 SPDY 的实验时，本文使用了 Apache2.4 作为服务器。在做 QUIC 的实验时，本文使用了一个 Google 的 QUIC 服务器。在回放过程中，本文使用 Selenium 来自动获取 Page Load Time (PLT) 参数。最后将获得的数据画出累积分布函数图像 (CDF) 并对图像加以分析。

4.2.2 实验结果分析

实验结果如图 8 所示。从图 8(a), (b), (c) 中可以看出，代表 HTTP1.1 的曲线比另外两条曲线

更加靠上。这说明在这一条件下 HTTP1.1 的性能更好。这三张图反映的是 RTT 为 20ms 的情况，在这个条件下网络延迟低，由此可以体现出 HTTP1.1 多重 TCP 连接的优势。

从图 8(d), (e), (f) 中可以看出，代表 HTTP1.1 的曲线在最下面，此时 RTT 为 200ms，这说明在网络延迟较高的时候，HTTP1.1 的性能较差。代表 SPDY 的曲线在丢包率为 0 的时候比较靠上，但是在丢包率提高的时候，就被代表 QUIC 的曲线超过了。这说明在丢包率较高的时候，QUIC 的性能比 SPDY 好。这可能是由 TCP 和 UDP 的机制导致的。TCP 在两个主机间维持连接。一旦连接丢失，它就要花费额外的开销来重建连接。UDP 不显式地维护可持续的连接，因此基于 UDP 的 QUIC 在高丢包率的网络环境中性能更好。

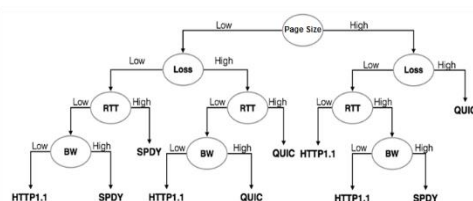


图 9 展示各个协议在不同网络环境下的性能的决策树

进一步地, 我们采用 ID3 算法^[19]构造决策树来衡量不同指标的影响情况, 如图 9 所示。通过决策树可以看出, 对不同协议下的加载性能影响最大的是页面大小, 其次是丢包率, 再次是延迟, 最后是带宽。

具体有如下结论:

- 在丢包率较高的网络环境下, 使用 QUIC 可以获得更好的浏览性能。而在丢包率较低的网络环境下, 使用 HTTP1.1 或 SPDY 可以获得更好的浏览性能。
- 在网络延迟较高的网络环境下, 使用 QUIC 和 SPDY 可以获得更好的浏览性能。而在网络延迟较低的网络环境下, 使用 HTTP1.1 可以获得更好的浏览性能。
- 在带宽较低的网络环境下, 使用 HTTP1.1 可以获得更好的浏览性能。而在带宽较高的网络环境下, 使用 QUIC 或 SPDY 可以获得更好的浏览性能。

5 讨论

本章首先讨论本文的发现和结论对浏览器厂商、Web 开发人员以及用户的启示。接下来对本文实验的局限性进行分析。

5.1 启示

(1) 对浏览器厂商

由于浏览器在加载具有不同特点的网页时的性能不一样 (例如, Chrome 加载图片占比较高的网页时的性能较差), 浏览器厂商可以针对浏览器的不足进行优化以提升加载速度 (例如, Chrome 浏览器可以对加载图片的性能加以优化)。另外, 由于在不同的网络环境下, 不同的网络协议之间也存在性能差异, 厂商可以使浏览器自动根据用户所处的网络环境来切换网络协议。

(2) 对 Web 开发人员

Web 开发人员应该使网页支持通过多种网络协议进行访问, 以便浏览器根据网络环境来切换网络协议。另外, 由于浏览器在加载具有不同特点的网页时的性能不一样 (例如, Chrome 在加

载 JavaScript 和 HTML 占比较高的网页时性能较好), 开发人员可以根据不同浏览器的特点来优化网页。

(3) 对用户

用户在浏览不同的网页时, 可以使用不同的浏览器进行浏览以获得最好的浏览体验。

5.2 实验局限性分析

本文的实验方案存在下列局限, 可能影响实验结论的正确性和普遍性:

(1) 浏览器的选择较为单一

本文在研究时, 只选用了 Chromium 和 Firefox 两个比较流行的浏览器进行研究。但是, 除了 Chromium 和 Firefox 这样的主流浏览器之外, 各大应用商店里还有上百个中小型厂商开发的浏览器。它们的内核和渲染方式等都不尽相同。Chromium 和 Firefox 并不能代表所有浏览器的情况。

(2) Mahimahi 模拟与真实浏览有差异

本文在进行实验时, 使用了 Mahimahi 来模拟访问, 并在 PC 端上通过修改 user-agent 的方式来模拟手机浏览, 这与真实在手机上进行浏览有一些差异。

(3) 网络环境参数不完整

本文在探究网络环境对浏览性能的影响时, 选取了几个固定的延迟、带宽和丢包率数值来表示相关参数是较大还是较小。但是在现实生活中, 这些参数并不只有几个固定值, 而是会连续变化的。如果选取更多的参数组合进行实验, 就可以得出更为完善的结果。

结束语 本文对在不同移动浏览器、不同网络协议和不同网络环境下的 Web 浏览性能进行了比较全面的度量分析。本文设计并建立了一个自动化的测试实验平台。它可以自动地记录网页数据, 并进行回放测试。本文选取了 Chromium 和 Firefox 对网页在不同浏览器上的加载性能进行研究, 选取了 HTTP1.1、SPDY 和 QUIC 对在不同网络协议下的加载性能进行研究, 选取了带宽、

网络延迟和丢包率对在不同网络环境下的加载性能进行研究。

最终的实验结果表明,网页在不同移动 Web 浏览器中加载结果的区别较大。由于加载机制不同,在加载具有不同特征的网页时,不同移动 Web 浏览器的性能也有所不同。在不同的网络条件下,采用不同的网络协议进行浏览,浏览性能也有很大的区别。本文的结论可辅助浏览器厂商和 Web 开发人员检查并修改潜在的缺陷,从而可以使终端用户在不同的环境中获得更好的浏览体验。

参考文献

- [1] CNNIC. The 39th Statistical Report on China's Internet Development[EB/OL]. 2017. http://www.cnnic.cn/hlwfzyj/hlwzxbg/hlwtjbg/201701/t20170122_66437.htm.
中国互联网络信息中心. 第三十九次《中国互联网络发展状况统计报告》[EB/OL]. 2017. http://www.cnnic.cn/hlwfzyj/hlwzxbg/hlwtjbg/201701/t20170122_66437.htm.
- [2] FIELDING R, GETTYS J, MOGUL J, et al. Hypertext transfer protocol--HTTP/1.1[R]. 1999.
- [3] Google. SPDY: An experimental protocol for a faster web[CP/OL]. <https://www.chromium.org/spdy/spdy-whitepaper>.
- [4] MEGYESI P, KRÄMER Z, MOLNÁR S. How quick is QUIC?[C]// Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2016: 1-6.
- [5] Alexa. The top 500 sites on the web. <http://www.alexa.com/topsites>.
- [6] Google. Speed Index. <https://sites.google.com/a/webpagetest.org/docs/using-webpagetest/metrics/speed-index>.
- [7] HUANG J, XU Q, TIWANA B, et al. Anatomizing application performance differences on smartphones[C]// Proceedings of the 8th international conference on Mobile systems, applications, and services. ACM, 2010: 165-178.
- [8] LIU X, MA Y, LIU Y, et al. Demystifying the Imperfect Client-Side Cache Performance of Mobile Web Browsing[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016, 15(9):2206-2220.
- [9] MA Y, LIU X, ZHANG S, et al. Measurement and analysis of mobile web cache performance[C]// Proceedings of the 24th International Conference on World Wide Web. International World Wide Web Conferences Steering Committee, 2015: 691-701.
- [10] WANG Z, LIN F X, ZHONG L, et al. Why are web browsers slow on smartphones?[C]// Proceedings of the 12th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications. ACM, 2011: 91-96.
- [11] BALASUBRAMANIAN N, BALASUBRAMANIAN A, VENKATARAMANI A. Energy consumption in mobile phones: a measurement study and implications for network applications[C]// Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM conference on Internet measurement conference. ACM, 2009: 280-293.
- [12] QIAN F, SEN S, SPATSCHECK O. Characterizing resource usage for mobile web browsing[C]// Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile systems, applications, and services. ACM, 2014: 218-231.
- [13] CARLUCCI G, DE CICCIO L, MASCOLO S. HTTP over UDP: an Experimental Investigation of QUIC[C]// Proceedings of the 30th Annual ACM Symposium on Applied Computing. ACM, 2015: 609-614.
- [14] DAS S R. Evaluation of QUIC on web page performance[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2014.
- [15] WANG X S, BALASUBRAMANIAN A, KRISHNAMURTHY A, et al. How speedy is SPDY?[C]// Proceedings of the 11th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI '14). 2014: 387-399.
- [16] NETRAVALI R, SIVARAMAN A, DAS S, et al. Mahimahi: Accurate Record-and-Replay for HTTP[C]// Proceedings of USENIX Annual Technical Conference. 2015: 417-429.
- [17] MANN H B, WHITNEY D R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other[J]. The annals of mathematical statistics, 1947: 50-60.
- [18] CLIFF N. Dominance statistics: Ordinal analyses to answer ordinal questions[J]. Psychological Bulletin, 1993, 114(3): 494.
- [19] QUINLAN J R. Induction of decision trees[J]. Machine learning, 1986, 1(1): 81-106.