



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

基于容器化多终端协同服务技术研究

作者姓名: 赵然

指导教师: 倪宏 研究员 中国科学院声学研究所

学位类别: 工学博士

学科专业: 信号与信息处理

培养单位: 中国科学院声学研究所

2019 年 6 月

L^AT_EX Thesis Template
of
The University of Chinese Academy of Sciences $\pi\pi\pi$

**A thesis submitted to the
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Engineering
in Signal and Information Processing**

By

Zhao Ran

Supervisor: Professor Ni Hong

Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences

June, 2019

中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的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，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对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或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则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、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘 要

本文是中国科学院大学学位论文模板 `ucasthesis` 的使用说明文档。主要内容为介绍 \LaTeX 文档类 `ucasthesis` 的用法，以及如何使用 \LaTeX 快速高效地撰写学位论文。

关键词：中国科学院大学，学位论文， \LaTeX 模板

Abstract

This paper is a help documentation for the \LaTeX class ucasthesis, which is a thesis template for the University of Chinese Academy of Sciences. The main content is about how to use the ucasthesis, as well as how to write thesis efficiently by using \LaTeX .

Keywords: University of Chinese Academy of Sciences (UCAS), Thesis, \LaTeX Template

目 录

第 1 章 基于容器化服务资源提供技术	1
1.1 引言	1
1.2 相关研究	1
1.2.1 计算迁移技术	1
1.2.2 Web Worker	2
1.2.3 虚拟化技术	3
1.3 基于边缘容器的 Web Worker 透明计算迁移系统设计	3
1.3.1 系统设计, 结构, 模块, 流程	4
1.3.2 透明迁移的客户端	4
1.3.3 基于容器的服务端	5
1.4 实验结果及分析	6
1.4.1 实验配置	6
1.4.2 实验结果	7
1.5 本章小结	8
第 2 章 资源受限终端任务调度策略	9
2.1 研究背景	9
2.2 相关工作	9
2.3 Dynamic Weight GOA with Random Jumping (DJGOA)	9
2.4 Improved GOA(IGOA)	9
2.5 实验	9
2.6 本章小结	9
附录 A 中国科学院大学学位论文撰写要求	11
A.1 论文无附录者无需附录部分	11
A.2 测试公式编号	11
A.3 测试生僻字	11
参考文献	13
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果	15
致谢	17

图形列表

表格列表

符号列表

字符

Symbol	Description	Unit
R	the gas constant	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
C_v	specific heat capacity at constant volume	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
C_p	specific heat capacity at constant pressure	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
E	specific total energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
e	specific internal energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
h_T	specific total enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
h	specific enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
k	thermal conductivity	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
S_{ij}	deviatoric stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
τ_{ij}	viscous stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
δ_{ij}	Kronecker tensor	1
I_{ij}	identity tensor	1

算子

Symbol	Description
Δ	difference
∇	gradient operator
δ^\pm	upwind-biased interpolation scheme

缩写

CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
EOS	Equation of State
JWL	Jones-Wilkins-Lee
WENO	Weighted Essentially Non-oscillatory
ZND	Zel'dovich-von Neumann-Doering

第 1 章 基于容器化服务资源提供技术

1.1 引言

随着计算机技术的快速发展和边缘计算技术的逐渐成熟，位于网络边缘的用户终端设备在用户的数字化生活中正扮演着越来越重要的角色，其定位逐渐从单一的用户服务发起者向用户服务的提供者转变。这会使用户终端承担越来越多的计算任务，这也对终端设备的服务质量和计算能力提出了越来越高的要求。为了满足用户对于服务质量的要求，人们提出了计算迁移技术，将终端设备上的计算任务通过网络迁移到云端服务器上来完成。但是引入云端协同的计算迁移技术，还是存在着时延较大、数据隐私性不能保证、成本较高等问题，难以满足用户需求。而另一方面，边缘终端设备距离用户更近，而且拥有很多空余资源没有得到充分利用，如何将这部分距离用户更近、成本更低的资源组织利用起来为用户设备提供计算迁移服务也成为了计算迁移技术中的一个值得研究的问题。本文以 HTML5 中的 Web Worker 方法为例，研究 Web 应用透明计算迁移到以容器形式部署在边缘设备上的服务端，设计并实现了一种基于容器的 Web Worker 透明边缘计算迁移系统，并利用若干实验来验证该系统能够将周围设备的资源利用起来，减少计算总执行时间，提升用户体验。

1.2 相关研究

1.2.1 计算迁移技术

传统的终端设备的服务模式通常是终端设备在本地进行计算任务的运行，依靠终端设备自身的计算能力来保证服务质量。而随着边缘智能终端设备所要承担的计算任务越来越重，单一终端设备本地计算难以满足终端服务和任务对终端计算能力的要求，计算迁移技术逐渐成为了一个可行的解决方案。计算迁移技术，也被称为计算卸载技术（computation offloading），是指将终端设备上的计算任务，通过网络的形式发送到其他设备上计算，再将计算结果通过网络返回给终端设备。

在边缘计算中，通常使用的方法是将边缘终端设备上的计算任务根据具体需求迁移一部分或迁移全部到云端计算资源上进行处理。云端计算资源通常是部署在云数据中心的机房，可以提供计算、存储、网络等资源。这种计算模式又被称为 Mobile Cloud Computing (MCC)。使用 MCC 的计算模式，可以让终端设

备提供更加复杂的计算服务，并且减少终端设备的能源消耗。但另一方面，终端设备与云数据中心之间会出现大量数据交互，产生大量网络延迟，并且可能会出现信息泄露等隐患，终端服务的实时性与安全性都不能得到保证。

为了拉近云数据中心与用户终端之间的距离，云端计算资源也会部署在网络边缘，例如基站、边缘服务器等等。这种计算模式又被称为 Mobile Edge Computing (MEC)。与 MCC 类似，MEC 也是一种集中式的云计算资源，需要资源服务器、中央管理器、移动网络等基础设施的支持，部署起来会比较复杂。目前对于 MEC 中计算迁移技术的研究，主要集中在计算迁移决策、计算资源管理及移动性管理三个方面，而对与 MEC 系统中的计算迁移方案的设计与实现研究较少。

文献【Cloudlets: Bringing the cloud to the mobile user】中介绍了一种计算迁移系统，利用部署在用户身边的可信的、计算资源丰富的计算设备（被称为 cloudlets）为移动用户提供服务。当用户在终端设备上产生服务请求时，终端设备可以在 cloudlets 上快速建立定制化的虚拟机，将计算任务迁移到对应虚拟机中并利用其资源来运行，用户可以利用轻量级客户端通过无线网络进行访问。cloudlets 模式是一种细粒度的计算迁移技术 [1]。这种计算迁移模式并没有在远端虚拟机中运行整个应用程序，而是将应用动态分割成多个可单独运行的组件，综合考虑每个组件的资源消耗情况、当前 cloudlets 状态、组件之间的依赖关系以及计算迁移决策等问题，来决定每个组件是否进行计算迁移。cloudlets 计算迁移模式相比 MCC 和 MEC，与用户之间的距离更近，传输时延更小，非常适合图书馆、咖啡厅、办公室等聚集场所。但 cloudlets 的缺点是需要区域内单独进行部署，需要额外的硬件、场地、服务器等成本，使用范围有局限性。

1.2.2 Web Worker

Web Worker 是一种基于 HTML5 的多线程方法，本文的研究对象就是面向 Web Worker 的计算迁移系统。基于 Web Worker 的服务系统可以拥有更好的跨平台性，应用开发者在开发服务应用的过程中可以不必考虑底层的系统架构。基于 Web Worker 的计算迁移方法分为透明迁移和非透明迁移两类。基于 Web Worker 的非透明迁移通常采用的方法是重写标准的 Web Worker 的接口 API，并在编写 Web 应用的时候以新的库的形式导入修改，使得 Web 应用在运行的时候通过 WebSocket 通知运行在云端的服务端程序生成相应的 Web Worker 来进行计算 [1234]。文献 [1] 中提出了一种基于 Web Worker 的透明迁移方法，通过修改 Web Worker 运行环境代码来实现计算迁移的过程，但是没有做具体实现。

1.2.3 虚拟化技术

很多计算迁移系统中也用到了虚拟化技术。虚拟化技术是一种资源管理技术，利用底层虚拟、上层隔离等方法，将计算机中的物理资源，如计算、存储和网络等，进行抽象、切割，以更好的形式提供给用户使用 [1]。当管理多个计算机资源的时候，利用虚拟化技术还可以将整个计算机集群进行虚拟化，形成资源池，可以更方便地管理计算机集群中的资源，也可以按需求给用户相应的虚拟资源，提高资源利用率，并且可以对用户保持透明，用户不必关心底层的资源是如何进行虚拟化和提供的。传统的抽象方法通常是硬件虚拟化，在计算机底层上建立 hypervisor 层，来对底层硬件进行虚拟化，并在其上运行虚拟化的操作系统。基于硬件虚拟化技术运行的实体通常被称为虚拟机，也叫 Virtual Machine (VM)。另外一种比较流行的抽象方法是操作系统 (OS) 虚拟化，这种虚拟化技术利用 LXC 技术在宿主机的操作系统之上进行隔离、封装。基于 OS 虚拟化技术运行的实体通常被称为容器，也叫 Container。

很多计算迁移的研究 [1-4] 都使用了虚拟机 VM 来作为云端承载迁移服务程序的基础。然而因为需要对底层硬件做虚拟化，所以使用虚拟机 VM 会引入极高的启动时延，这对于响应时间敏感的终端用户服务来说是难以接受的。如果考虑提前部署虚拟机 VM 的方案，虽然能够减少启动时间带来的时延，但相对重型的虚拟机 VM 解决方案也会带来较大的额外开销，这也是一种不太能够接受的服务费用以及资源浪费 [2]。文献 [3] 中提出使用基于 OS 虚拟化技术的容器来代替虚拟机 VM，承载云端迁移服务程序。这种轻量级的虚拟化技术不仅能够大大减少启动时间带来的时延，也能够大大降低虚拟化技术带来的额外资源开销。

1.3 基于边缘容器的 Web Worker 透明计算迁移系统设计

为了将用户身边终端设备的空闲资源利用起来，并且方便部署管理，对 Web 应用开发者透明，本文提出一种基于边缘容器的 Web Worker 计算迁移系统。计算迁移系统的实质是利用冗余来提高终端服务系统的服务质量，而对于用户的终端环境来说，用户身边还有着大量的终端设备都处于空余状态，拥有大量的空闲资源可以用来提供计算迁移服务。同时，相比其他边缘计算迁移系统，这种身边的终端距离用户所使用的终端距离更近，网络状况、时延等情况更优，计算迁移服务质量也会更好。虽然终端空闲资源总数庞大，但是与集中式云端资源相比，终端资源分布得比较零散，不方便部署，因此我们使用 swarm 容器集群来对提供迁移服务的终端空余资源进行管理和应用。另一方面，我们修改 Web 运行

环境代码，设计对 Web 应用开发者透明的计算迁移系统，将 Web Worker 迁移到服务端进行运行。

1.3.1 系统设计，结构，模块，流程

基于边缘容器的 Web Worker 计算迁移系统分为客户端与服务端。图 7 为 Web Worker 计算迁移系统的模块图。客户端也就是用户终端上的 Web 运行环境，可以接收用户请求，通常会根据用户请求生成以多个 Web Worker 形式承载的计算任务。当用户终端资源不足以完成该计算任务，或者完成时间较长，希望能够缩短计算时间提高用户体验的时候，客户端程序可以将计算任务以 Web Worker 的形式迁移到服务端来完成。服务端是一个能够接收计算迁移任务请求的应用程序，并在本地生成 Web Worker 运行迁移过来的计算任务。服务端通常以容器的形式部署在周围有空余计算资源的其他终端上，并受整个边缘容器集群管理。需要指出的是，边缘容器集群中是由多个用户终端设备组成，每个终端设备在有计算任务的时候都可以成为客户端，向其他设备迁移计算任务，在没有计算任务的时候也都可以成为服务端，接受其他设备迁移过来的计算任务。

1.3.2 透明迁移的客户端

客户端包含 Web 应用和重写的 Web 运行环境两个部分。Web 运行环境在本研究中主要指运行在用户终端上的 Web 浏览器，它能够为 HTML5 及 Javascript 提供标准支持。因为设计的计算迁移系统为透明迁移，所以 Web 应用只需要调用标准的 Web Worker 接口就可以生成 Web Worker 并与其进行通信，而不需要对 Web 应用本身做任何特殊的改动，Web 应用开发者也不需要了解底层是如何实现的。底层的 Web 运行环境被重新改写，主要包含 Web Worker 管理端和 websocket 通信客户端。当系统决定要进行计算迁移的时候，Web Worker 管理端在收到上层 Web 应用通过标准接口传来的 Web Worker 生成的请求的时候，会将该请求进行翻译并重新封装，Web 运行环境中的 websocket 通信客户端模块会通过 websocket 将封装后的请求发送到服务端进行处理。

在后续的通信中，客户端与运行在服务端的 Web Worker 也要进行很多信息交互，这些通信也是以 websocket 的形式进行的，因此需要为 websocket 设置几种通信标志，来区分不同的通信类型。本研究中主要设置三种通信标志：

- ESTABLISH: 客户端请求服务端创建新的 Web Worker，由服务端直接进行处理
- COMMUNICATE: 客户端向服务端发送的通信信息，由服务端接收后转发

给服务端对应的 Web Worker

- **TERMINATE**: 客户端请求服务端停止对应的 Web Worker，由服务端直接进行处理

添加通信标志的操作是在客户端中的 websocket 通信客户端重新封装请求的过程中实现的。这些通信标志可以让服务端区分该信息是控制类型（ESTABLISH、TERMINATE）还是数据类型（COMMUNICATE），并根据通信类型的不同采取不同的处理方式。

1.3.3 基于容器的服务端

图 1-10 中右侧为服务端程序的模块。服务端程序包括底层的 Javascript 运行环境、websocket 通信服务端以及 Web Worker 管理端。Javascript 运行环境用来提供 Javascript 标准接口，支撑整个服务端程序以及 Web Worker 的运行。websocket 通信服务端用来接受客户端发来的消息，并且对其解封装，根据通信标志的不同，做相应的处理。Web Worker 管理端，接受通信服务端传来的指令，调用 Web Worker 标准接口，实现对 Web Worker 生命周期的管理，包括 Web Worker 的创建、信息交互及销毁。

图 1-11 为整个系统的整体架构图。服务端程序是以容器的形式部署在边缘 Docker Swarm 集群上的。这个过程需要使用 Dockerfile 生成安装有对应运行环境及服务端程序的 Docker 镜像，并将生成的镜像上传到本地镜像仓库中。接下来需要由 Docker Swarm 集群从镜像仓库中拉取对应镜像，按照对资源及服务规模的需求生成相应的迁移服务，并通过 Docker Swarm 的调度器在合适的终端节点上启动相应数量的副本实例，也就是运行着服务端程序的容器，打开对应端口，为用户终端提供计算迁移服务。每个容器在哪个节点上运行是由 Docker Swarm 调度器上执行的调度策略来决定的。

计算迁移的过程被分为 4 个阶段，运行时准备阶段，网络连接阶段，数据传输阶段，任务执行阶段 [1]。在运行时准备阶段中，服务端使用 Dockerfile 生成安装有对应运行环境及服务端程序的 Docker 镜像，或者直接从本地镜像仓库中下载对应镜像，创建对应服务，在节点上部署对应容器，并对外暴露服务端口。在网络连接阶段中，客户端接收到用户请求，Web 应用根据用户请求向底层 Web 运行环境发送 Web Worker 的创建请求，客户端的 Web Worker 管理端会将带有创建 Web Worker 所需要的信息的 JS 文件的 URL 加上一个 ESTABLISH 标志，封装后交给客户端的 websocket 客户端。此时 websocket 客户端会向服务端暴露出

的服务 IP 和端口请求建立连接，通过服务端 Docker Swarm 的调度以后，客户端与某个容器上运行的服务端的 websocket 服务端建立网络连接。websocket 服务端在接收到消息后会进行解封装，读取通信类型标志并根据消息内容中包含的 URL 下载对应 JS 文件。然后服务端上的 Web Worker 管理端会在对应容器中运行该 JS 文件，创建 Web Worker。在数据传输阶段中，websocket 客户端发送的信息带有 COMMUNICATE 通信标志，代表信息中包含的内容是 Web 应用发送给 Web Worker 的数据信息，websocket 服务端解析到该标志后，会直接将信息转发给在容器中运行的 Web Worker。在任务执行阶段中，运行在边缘容器中的 Web Worker 会利用容器中配置的资源，执行对应计算任务，并将计算结果通过网络返回给用户的客户端设备。当该客户端接收到某个 Web Worker 返回的全部数据，则会向该服务端发送带有 TERMINATE 标志的信息，服务端在接收到该消息后，会销毁对应容器中运行的 Web Worker，释放相关资源。此时该容器并不会随之销毁，而是可以等待下一次计算迁移任务，直到整个 Docker Swarm 集群对该容器的生命周期进行调整。

1.4 实验结果及分析

1.4.1 实验配置

本研究中使用树莓派设备来模拟用户终端设备及边缘终端设备，搭建基于容器的 Web Worker 透明边缘计算迁移系统，并测试其对于用户服务体验的提升效果。本实验中的客户端以及服务端集群使用的树莓派型号为 raspberry pi3，配置为 1G 内存，4 核处理器。服务端 Docker Swarm 集群由局域网内的 4 个树莓派组成，其中一个作为 master，另外三个作为 worker，每个树莓派节点上都可以作为计算迁移服务的执行节点。另外为了与基于容器的边缘集群的性能做对比，我们还使用了一台局域网内的 Dell PowerEdge R 730 服务器作为服务端来进行实验。本实验中客户端的 Web 运行平台为 chromium 浏览器，服务端的 JS 执行环境为基于 V8 引擎的 Node.JS。

本实验中的测试用例为利用一个利用 Web Worker 的图形渲染 Web 应用 Ray Tracing[<http://nerget.com/rayjs-mt/rayjs.html>]。在这个应用中，Web 应用需要渲染加载一张图片，具体过程是将图片切割成若干份（本实验中为 20 份），启动一定数量的 Web Worker 来进行渲染加载。这个测试用例中，图片总大小是一样的，也就是总的任务量一定，使用的 Web Worker 数量越多，每个 Web Worker 计算的任务量就越少，同时 Web Worker 数量与切割份数不一定相同，可能出现一

个 Web Worker 需要处理多份任务的情况。在本实验中，Ray Tracing 应用可以不做任何修改，直接运行在客户端树莓派的 chromium 上，然后改写后的浏览器将计算任务迁移到边缘树莓派集群或服务器上，创建 Web Worker 并进行计算，最后将结果返回给客户端，浏览器将图片显示给用户。本实验中对基于容器的 Web Worker 透明边缘计算迁移系统服务性能的评价指标为 Web Worker 的总体执行时间，即从第一个 Web Worker 开始创建，到最后一个 Web Worker 执行完成所消耗的时间。

1.4.2 实验结果

为了测试不迁移、迁移到服务器以及迁移到边缘树莓派集群上的服务性能，我们做了实验一，图片大小为 200*200，切分为 20 份 200*10 的小图片，交给不同数量的 Web Worker 来进行计算，实验结果如图 1-10 所示，其中横坐标表示每一次实验中的 Web Worker 数量，纵坐标表示该次实验中的 Web Worker 执行总时间。

从图 1-10 中可以看出，不使用计算迁移系统的时候，执行总时间最长，服务性能最差，而且随着 Web Worker 数量的增加，性能变差得非常明显，让用户的用户体验变得非常差。迁移到边缘树莓派集群上的时候，相比不迁移的情况，性能提升明显，虽然执行时间比迁移到服务器的情况稍差，但相差不是很大，还是能够保持在用户可接受范围内。另外随着 Web Worker 数量的增加，迁移到边缘树莓派集群的执行总时间会慢慢增加，但增长趋势比较缓慢，不会出现不迁移时候的明显变差的情况。迁移到服务器上的时候，执行时间最短，尤其是在 Web Worker 数量为 1 的时候，优势非常明显，但这更多的是基于服务器本身性能要远远好于单个树莓派的原因。在实际应用场景中，使用服务器来提供计算迁移服务的成本要远远高于使用边缘终端设备，而且实际场景中的服务器通常位于云端数据中心，距离用户终端设备较远，网络通信开销会增大，同时还会受限于网络状况，服务性能很可能达不到这么好的效果。

为了测试透明迁移到边缘树莓派集群与非透明迁移到集群的服务性能差异，我们做了实验二，图片大小为 400*400，切分为 20 份 400*20 的小图片，交给不同数量的 Web Worker 来进行计算，实验结果如图 1-11 所示，其中横坐标表示每一次实验中的 Web Worker 数量，纵坐标表示该次实验中的 Web Worker 执行总时间。

从图 1-11 中可以看出，相比实验一，图片大小变大，总任务量变多，总的计算

时间也相应增加。不使用计算迁移系统的时候，执行总时间还是最长，服务性能最差，而且随着 Web Worker 数量的增加，性能变差得非常明显，让用户的用户体验变得非常差。另外值得注意的一点是，不适用计算迁移系统的时候，在使用 4 个 Web Worker 来执行任务的时候，总执行时间最短，这可能与树莓派设备是 4 核处理器有关，当 Web Worker 数量小于 4 个的时候，会出现树莓派的计算能力没有被充分利用的情况，当 Web Worker 数量大于 4 个的时候，会出现各个线程之间抢占 CPU 而导致切换时间大大增加影响总执行时间的情况。使用计算迁移后，总的执行时间都会大大缩短，当 Web Worker 数量多于 4 个的时候，边缘树莓派集群中多设备多核处理器的优势就体现出来了，当 Web Worker 数量增加的时候，总执行时间也不会随之增加很多，稳定在一个比较短的时间内。对比透明计算迁移方式和非透明计算迁移方式的实验结果，可以看出，透明计算迁移方式的总执行时间也要比非透明计算迁移方式的总执行时间要短一些，整体服务效果更好。

1.5 本章小结

本章。。。。。

第 2 章 资源受限终端任务调度策略

- 2.1 研究背景
- 2.2 相关工作
- 2.3 Dynamic Weight GOA with Random Jumping (DJGOA)
- 2.4 Improved GOA(IGOA)
- 2.5 实验
- 2.6 本章小结

附录 A 中国科学院大学学位论文撰写要求

学位论文是研究生科研工作成果的集中体现，是评判学位申请者学术水平、授予其学位的主要依据，是科研领域重要的文献资料。根据《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》（GB/T 7713-1987）、《学位论文编写规则》（GB/T 7713.1-2006）和《文后参考文献著录规则》（GB7714—87）等国家有关标准，结合中国科学院大学（以下简称“国科大”）的实际情况，特制订本规定。

A.1 论文无附录者无需附录部分

A.2 测试公式编号

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \\ \frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \\ \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{V}) \end{array} \right. \quad \dots \text{ (A.1)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} u \, d\Omega + \int_{\Sigma} \mathbf{n} \cdot (u \mathbf{V}) \, dS = \dot{\phi} \quad \dots \text{(A.2)}$$

A.3 测试生僻字

[illegible]

[illegible]

参考文献

- [1] WIKIBOOK. <http://en.wikibooks.org/wiki/latex>[M]. On-line Resources, 2014.
- [2] LAMPORT L. Document preparation system[M]. Addison-Wesley Reading, MA, 1986.
- [3] 陈浩元. 著录文后参考文献的规则及注意事项[J]. 编辑学报, 2005, 17(6):413-415.
- [4] 初景利. 图书馆数字参考咨询服务研究[M]. 北京: 北京图书馆出版社, 2004.
- [5] STAMERJOHANN S H, GINEV D, DAVID C, et al. MathML-aware article conversion from LaTeX[J]. Towards a Digital Mathematics Library, 2009, 16(2):109-120.
- [6] BETTS L R, TAYLOR C P. Aging reduces center-surround antagonism in visual motion processing[J]. Neuron, 2005, 45(3):361-366.
- [7] BRAVO H, OLAVARRIA J. Comparative study of visual inter and intrahemispheric cortico-cortical connections in five native chilean rodents[J]. Anatomy and embryology, 1990, 181(1):67-73.
- [8] 哈里森·沃尔德伦. 经济数学与金融数学[M]. 谢远涛, 译. 北京: 中国人民大学出版社, 2012: 235-236.
- [9] 牛志明, 斯温兰德, 雷光春. 综合湿地管理国际研讨会论文集[C]. 北京: 海洋出版社, 2013.
- [10] 陈晋镛, 张惠民, 朱士兴, 等. 蓟县震旦亚界研究[M]//中国地质科学院天津地质矿产研究所. 中国震旦亚界. 天津: 天津科学技术出版社, 1980: 56-114.
- [11] 袁训来, 陈哲, 肖书海. 蓝田生物群: 一个认识多细胞生物起源和早期演化的新窗口 – 篇一[J]. 科学通报, 2012, 57(34):3219.
- [12] 袁训来, 陈哲, 肖书海. 蓝田生物群: 一个认识多细胞生物起源和早期演化的新窗口 – 篇二[J]. 科学通报, 2012, 57(34):3219.
- [13] 袁训来, 陈哲, 肖书海. 蓝田生物群: 一个认识多细胞生物起源和早期演化的新窗口 – 篇三[J]. 科学通报, 2012, 57(34):3219.
- [14] WALLS S C, BARICHIVICH W J, BROWN M E. Drought, deluge and declines: the impact of precipitation extremes on amphibians in a changing climate[J/OL]. Biology, 2013, 2(1):399-418[2013-11-04]. <http://www.mdpi.com/2079-7737/2/1/399>. DOI: 10.3390/biology2010399.
- [15] ボハンデ. 過去及び現在に於ける英国と会[J]. 日本時報, 1928, 17:5-9.
- [16] Дубровина. И. Открытое письмо Председателя Главного Совета Союза Русского Народа Санкт-Петербургскому Антонию, Первенствующему члену Священного Синода [J]. Вече, 1906:1-3.

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

本科生无需此部分。

作者简历

casthesis 作者

吴凌云，福建省屏南县人，中国科学院数学与系统科学研究院博士研究生。

ucasthesis 作者

莫晃锐，湖南省湘潭县人，中国科学院力学研究所硕士研究生。

已发表 (或正式接受) 的学术论文:

[1] ucasthesis: A LaTeX Thesis Template for the University of Chinese Academy of Sciences, 2014.

申请或已获得的专利:

(无专利时此项不必列出)

参加的研究项目及获奖情况:

可以随意添加新的条目或是结构。

致 谢

感激 `casthesis` 作者吴凌云学长, `gbt7714-bibtex-style` 开发者 `zepinglee`, 和 `ctex` 众多开发者们。若没有他们的辛勤付出和非凡工作, \LaTeX 菜鸟的我是无法完成此国科大学位论文 \LaTeX 模板 `ucasthesis` 的。在 \LaTeX 中的一点一滴的成长源于开源社区的众多优秀资料和教程, 在此对所有 \LaTeX 社区的贡献者表示感谢!

`ucasthesis` 国科大学位论文 \LaTeX 模板的最终成型离不开以霍明虹老师和丁云云老师为代表的国科大学位办公室老师们制定的官方指导文件和众多 `ucasthesis` 用户的热心测试和耐心反馈, 在此对他们的认真付出表示感谢。特别对国科大的赵永明同学的众多有效反馈意见和建议表示感谢, 对国科大本科部的陆晴老师和本科部学位办的丁云云老师的细致审核和建议表示感谢。谢谢大家的共同努力和支持, 让 `ucasthesis` 为国科大学子使用 \LaTeX 撰写学位论文提供便利和高效这一目标成为可能。

