

# 面向多计算框架的容器云资源调 度研究与实现

(申请清华大学工学硕士学位论文)

培 养 单 位: 计 算 机 科 学 与 技 术 系

学 科: 计 算 机 科 学 与 技 术

研 究 生: 龚 坤

指 导 教 师: 武 永 卫 教 授

二〇一九年六月



# **Research and Implementation of Container Cloud Resource Scheduling for Multi-dimensional Computing Framework**

Thesis Submitted to

**Tsinghua University**

in partial fulfillment of the requirement

for the professional degree of

**Doctor of Engineering**

by

**Gong Kun**

**( Computer Science and Technology )**

Thesis Supervisor : Professor Wu Yongwei

**June, 2019**



# 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：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：(1) 已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；(2) 为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容。

本人保证遵守上述规定。

**(保密的论文在解密后应遵守此规定)**

作者签名：\_\_\_\_\_

导师签名：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_

日 期：\_\_\_\_\_



## 摘 要

Docker 容器虚拟化技术能够和宿主机共享系统资源并且实现容器间的隔离，是当前技术研究的热点，已经成为容器的代名词。基于 Docker 的私有容器云平台获得广泛的应用，开始逐步取代传统虚拟机为基础构建的云计算系统。与传统的云计算集群类似，一个高效且强大的容器编排管理系统对数据中心资源利用率和集群性能具有至关重要的作用，Kubernetes 是当前容器云系统中应用最为广泛的容器调度系统，其轻量开源和强大的服务发现、集群监控和错误恢复能力深受用户好评。但 Kubernetes 过度专注于调度器能力和性能，其自身的资源分配和调度算法单一往往导致整个容器云集群资源利用率和均衡性很差，尤其是在多种计算框架同时部署的情况下其调度缺陷暴露无遗。

近年来，OpenShift 容器云平台用户针对 Kubernetes 调度器的不足往往需要开发自己的调度算法来适应特定的应用场景，这对追求性能和资源利用率的普通用户往往具有一定的难度，本文在深入分析 OpenShift 私有容器云平台 Kubernetes 调度器核心调度技术后，提出了一种全新的调度方案，本文主要内容如下：

- 基于开源的 OpenShift Origin 构建私有容器云平台 Paladin，在该平台上开发部署 Hadoop、Spark、MPI、Storm、Regraph 等十多种分布式计算框架，能够根据用户需求快速构建分布式计算平台。
- 深入研究 Kubernetes 调度核心技术，针对其调度算法的不足，提出了一种基于多维资源空闲率权重的评价函数和调度方法，该方法综合考虑物理节点 CPU、内存、磁盘、网络带宽空闲率和已部署的容器应用个数等因素影响，使用模糊层次分析法 FAHP(Fuzzy Analytic Hierarchy Process) 对集群资源自动建模并求解容器应用多维资源权重参数，选取最大评分节点进行容器调度。
- 针对新提出的调度方案，在 CloudSim-4.0 容器云仿真平台进行调度仿真，并与 Kubernetes 默认调度方案、Random 调度方案进行对比，能够极大提升容器云集群资源利用率和实现负载均衡性
- 在私有容器云平台 Paladin 上设计并实现该调度方案，使用多个计算框架同时进行调度性能测试，能够极大缩短多计算框架的应用执行时间。

**关键词：**Docker；容器云；调度策略；OpenShift 平台；计算框架；FAHP

## **Abstract**

An abstract of a dissertation is a summary and extraction of research work and contributions. Included in an abstract should be description of research topic and research objective, brief introduction to methodology and research process, and summarization of conclusion and contributions of the research. An abstract should be characterized by independence and clarity and carry identical information with the dissertation. It should be such that the general idea and major contributions of the dissertation are conveyed without reading the dissertation.

An abstract should be concise and to the point. It is a misunderstanding to make an abstract an outline of the dissertation and words “the first chapter”, “the second chapter” and the like should be avoided in the abstract.

Key words are terms used in a dissertation for indexing, reflecting core information of the dissertation. An abstract may contain a maximum of 5 key words, with semi-colons used in between to separate one another.

**Key Words:** Docker; container cloud; scheduling strategy; openshift platform; computing framework; FAHP



# 目 录

第 1 章 引言 .....	1
1.1 云计算调度概述 .....	1
1.2 容器云调度概述 .....	2
1.3 论文主要工作和结构安排 .....	3
1.3.1 论文的主要工作 .....	3
1.3.2 本文结构安排 .....	4
第 2 章 OpenShift 私有容器云平台调度系统 .....	5
2.1 Docker 虚拟化与 OpenShift 平台 .....	5
2.1.1 Docker 虚拟化技术 .....	5
2.1.2 OpenShift 容器云平台 .....	6
2.2 定理环境 .....	9
2.3 参考文献 .....	12
2.4 公式 .....	12
第 3 章 中华人民共和国 .....	14
3.1 其它例子 .....	14
3.1.1 绘图 .....	14
3.1.2 插图 .....	14
插图索引 .....	17
表格索引 .....	18
公式索引 .....	19
参考文献 .....	20
致 谢 .....	22
声 明 .....	23
附录 A 外文资料原文 .....	24
A.1 Single-Objective Programming .....	24
A.1.1 Linear Programming .....	25
A.1.2 Nonlinear Programming .....	26
A.1.3 Integer Programming .....	27

附录 B 外文资料的调研阅读报告或书面翻译 .....	28
B.1 单目标规划 .....	28
B.1.1 线性规划.....	28
B.1.2 非线性规划 .....	29
B.1.3 整数规划.....	29
附录 C 其它附录 .....	30
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果 .....	31

## 第 1 章 引言

随着计算机互联网技术的飞速发展，网络规模不断扩大，各行业中应用业务量和数据呈现爆炸式的增长，如何快捷处理各种应用产生的海量数据已成为各大互联网公司面临的一个巨大挑战。继分布式计算、网格计算和并行计算后，一种全新的将整个互联网资源聚合起来处理数据的计算模式应运而生：云计算。这种按需付费、共享资源、统一管理、可伸缩、可度量的计算模式发展迅猛，已经给信息产业带来了巨大的影响。

然而，云计算往往是以虚拟机作为云主机进行构建，将用户对资源的需求和软件服务虚拟化成虚拟机资源，然后进行虚拟机创建、操作系统安装以及应用部署。这虚拟化方式存在巨大的虚拟化开销，并且不同的虚拟机操作系统不同，其应用跨平台性较差。近年来，容器逐步取代虚拟机技术成为云计算的主流技术，给云计算带来新的革命，尤其是以 **Docker** 为代表的容器虚拟化技术获得了飞速的发展，基于 **Docker** 技术的容器云如雨后春笋般出现。云平台以其快速的应用部署、启动、交付以及优异的跨平台性能迅速占领市场。

与传统的云计算模式相似，一个强大的资源调度系统对集群性能和资源利用率起到决定性作用，**Docker** 虚拟化作为一种新型的容器云技术解决方案，其容器编排能力还存在很多不足。**Google** 开发的 **Kubernetes** 是容器云中容器调度系统的优秀代表，其轻量开源和强大的编排能力深受人们好评，但是其调度算法单一和资源利用不均衡性成为制约其性能的重要因素，本文在深入研究 **Kubernetes** 调度流程的基础上，设计并实现了一种新的调度方案，部署在基于开源 **OpenShift Origin** 开发的私有容器云 **Paladin** 上，极大提升了多种计算框架应用的性能。

### 1.1 云计算调度概述

云计算是当前较为普遍的一种分布式计算方式，通过将计算资源聚合成资源共享池对外提供按需付费、弹性计算的能力，对当前的计算机技术带来巨大的影响。其服务资源池有基础设施即服务 (**IaaS**, **Infrastructure as a Service**)、平台即服务 (**PaaS**, **Platform as a Service**) 以及软件即服务 (**SaaS**, **Software as a Service**) 三种服务模式。其计算类型根据用户对象的不同可以划分为公有云、私有云和混合云，典型的公有云有 **Google Gmail**、**Amazon** 的 **EC2**、微软 **Azure**、阿里云 **ECS**、百度云、腾讯云等。云计算需要底层的虚拟化技术作为支撑，当前维基百科收录的就有超过 60 种虚拟化技术，其中基于 **X86** 体系的虚拟化超过 50 种，当然也有 **RISC** 体

系的虚拟化,主要包括硬件虚拟化、操作系统层虚拟化、桌面虚拟化、应用程序虚拟化以及网络虚拟化等。从虚拟化的实现方式上可以划分为宿主架构和裸金属架构两种方式,其中宿主架构中虚拟机作为宿主操作系统的一个进程进行进行调度和管理,主要在个人的 PC 端应用较为广泛,如 VirtualBox、VMware Workstation、WindowVirtual PC 等。裸金属架构则不需要主机操作系统,直接以 Hypervisor 运行于物理硬件上,主要应用于服务器的虚拟化,本文主要关注服务器端大规模的云计算。应用最为广泛的如微软的 Hyper-V、VMWARE 的 ESX、开源的 XEN 和 KVM 等,云计算虚拟化架构中通常以虚拟机的方式提供给用户,用户根据自己的资源需求和软件服务申请合适的虚拟机进行服务,再进行大规模云计算环境构建时应选择合适的虚拟化架构方式,实现统一管理和跨平台的资源调度,综合利用各种虚拟化的性能优势,达到最终的目标。

在云计算中,资源的调度器对集群的性能和资源利用率起到决定性作用,是云计算的核心。传统虚拟机式的云计算集群对调度策略有相当多的研究,主要集中在降低系统能耗、提高数据中心资源利用率、集群服务器的负载均衡以及基于成本模式的资源管理研究。文献 [1] 出一种根据虚拟机负载动态调节处理器电压和频率来降低集群能耗;文献 [2] 通过动态分配云计算中心的虚拟机,减少服务器的数量来节约能耗;文献 [3] 通过提出一种中心平衡器的平衡算法来实现集群服务器的负载均衡;文献 [4] 将应用需求和物理机计算资源建模,基于蚁群算法、粒子群算法等迭代方式求解最佳分配策略,减少服务器的数量,从而提升集群资源的利用率;文献 [5] 提出面向市场的体系结构和资源分配调度方法,该体系结构通过 SLA 资源分配器实现用户和服务商的协商,从而实现资源的优化配置。由此看出,在虚拟机式的云计算中,人们云计算资源调度方法进行深入的研究,广泛应用于当前的云计算系统中,对推动云计算的普及起到的巨大的推动作用。

## 1.2 容器云调度概述

虚拟机是当前云计算的主要实现形式,也是云计算的核心技术之一,除了虚拟机,容器在云计算中应用越加广泛,容器云发展迅猛。当前容器虚拟技术以 Docker 为典型代表,Docker 的底层实现是 LXC(Linux Container),LXC 的资源管理完全依赖于内核的控制组 (cgroups)。和传统的虚拟技术不同、LXC 提供的虚拟环境是在操作系统层面实现的,主要面向进程,LXC 提供的虚拟环境也就是容器,操作系统可以为容器分配各种 CPU 时间、I/O 时间、内存、访问控制等,并提供单独的命名空间。其隔离性主要依赖于 Linux 内核的 namespace 特性,命名空间让进程之间彼此隔离,这种既能与宿主机共享资源又能同时提供用户隔离的虚拟化方案迅速

受到人们关注。以容器为虚拟化技术可以实现虚拟化较小的开销，应用可以实现快速的部署、交付以及较好的跨平台性。以 Docker 为基础构建的 CaaS(Container as a Service) 应运而生，各大互联网公司投入巨资进行研发，根据 451 Research 预测，容器作为一种高速成长型的工具，年增幅高达 40%。将作为应用最为广泛的云工具，超过 OpenStack、PaaS 以及其他相关的产品，根据其预测，应用容器将从 2016 年的 7.62 亿美元增长到 2020 的 27 亿美元，其预测是根据 125 家应用容器厂商为基础做出的。容器的管理和调度市场也在进行快速的组合并购，Apprenda 收购 Kubernetes 支持者 Kismatic，思科收购 Docker Swarm 支持者 ContainerX 等，这些活动都加速了容器云的飞速发展，当前较为出色的有 Google Container Engine、SAE、Cloud Foundry、AWS ECS、Red Hat OpenShift 等

容器云和传统的以虚拟机与基础构建的云计算一样需要一个性能强大的容器编排管理器负责容器的调度、创建、销毁、监控、重启、错误恢复以及服务的组合灯工作，决定容器云集群的性能和资源利用率，容器调度器同时也是推动容器迅速实现应用的重要因素。当前主要有三大主流的容器调度框架：Docker Swarm、Apache Mesos 以及 Google Kubernetes，其中应用最为广泛的要属开源轻量，性能强大的 Kubernetes。在调度架构和调度模式上三种调度框架也各不相同，Swarm 中调度算法主要包括最少容器、最多容器和随机调度三种；Memsos 则侧重于负载均衡，更多使用传统的虚拟机调度方法，如 DRF(Dominant Resource Fairness) 实现资源分配；Kubernetes 使用两阶段过滤评分选取最大评分的节点实现资源调度。几种调度方式各有优缺点，用户可以根据自己的需求不同选取响应的容器调度框架构建不同的容器云计算环境，实现资源更好的分配和调度，本文主要对 Kubernetes 的调度方式进行研究，在多种计算框架应用部署的情况下实现资源利用最大化，使应用的执行时间更短。

## 1.3 论文主要工作和结构安排

### 1.3.1 论文的主要工作

基于 Docker 容器虚拟化技术的 PasS 层 OpenShift 容器云平台使用 Kubernetes 进行容器管理和调度，该调度方式通过预选和优选两阶段选取评分最优的节点作为容器调度的目标，在优选阶段仅考虑内存和 CPU 的影响因素。本文针对其调度方式造成的资源利用率较低和负载不均衡的缺点，设计和实现了一个基于数学方法 FAHP 集群资源建模和参数自动求解的调度器，主要工作如下：

- (1) 基于开源的 OpenShift Origin 构建实验室私有 PaaS 层容器云平台 Paladin，在该平台上开发部署十多种分布式计算框架，普通用户可以根据实际需求快速

配置和构建自己所需的计算环境。

- (2) 深入分析 OpenShift 容器编排管理器 Kubernetes 的调度流程和不足之处，提出了一种综合考虑应用特性的多维资源空闲率权重的评价函数和调度方法，该方法充分考虑容器应用 CPU、内存、磁盘、网络带宽和已部署 Pod 数量的影响，最后通过对集群物理节点资源和应用资源的数学建模，利用 FAHP 方法自动构建满足一致性要求的模糊成对比矩阵和判断矩阵，实现应用参数权重的自动求解，选取评分最高的节点作为容器应用的调度目标。
- (3) 在容器仿真平台 CloudSim-4.0 上对新的调度方案进行仿真，对比分析 Kubernetes 调度方法以及 Random 调度方法的性能，实验表明能够极大提高集群资源利用率和实现负载均衡。
- (4) 在私有容器云平台 Paladin 上设计开发该调度方案，部署多种计算框架应用进行应用性能测试，实验表明新的调度方案能极大缩短多种计算框架的执行时间，提升私有容器云集群性能。

### 1.3.2 本文结构安排

本文总共分为六个章节，第一章主要阐述传统虚拟机技术构建的云计算和新兴 Docker 容器技术构建的容器云，云计算底层虚拟化技术的基本架构、典型的云计算服务和云计算中资源调度器方法。接着介绍容器云底层的容器虚拟化技术支撑，代表性的容器云服务以及三大主流的容器编排器，进而引出 Kubernetes 容器编排器的不足和本文需要研究解决的问题。第二章首先对比 Docker 容器虚拟化技术和传统虚拟机技术以及 Docker 构建的容器云平台，接着比较分析容器云中三种主要的调度系统，最后针对 Kubernetes 容器编排管理器的组织架构、调度流程和原理以及其调度的不足进行深入分析。第三章针对 Kubernetes 调度器不足，设计一种新的调度方法和调度流程，新的调度方案充分考虑容器应用特点和集群物理资源的特点，主要包括其调度流程、多维资源建模、反馈器的设计以及全新的评价函数构建。第四章使用 FAHP 方法解决新的调度方案中多维资源权重的问题，对应用和集群资源进行数学建模、自动构造满足一致性要求的建模糊成对比矩阵和判断矩阵，自动求解应用资源权重参数。第五章首先使用 CloudSim-4.0 进行仿真环境的搭建，对比分析新的调度方法和 Kubernetes 默认调度方案以及 Random 调度方法在集群资源利用率、负载均衡性方面的性能。然后在实验室私有容器云平台 Paladin 上开发部署十几种分布式计算框架，将新的调度方案应用于 Paladin 中，使用多个计算框架应用对其性能进行测试。最后一章对本文工作进行总结，展望未来的研究方向。

## 第2章 OpenShift 私有容器云平台调度系统

本章从 Docker 虚拟化技术出发，介绍在 Docker 基础上构建的三种典型集群管理系统：一体式调度系统、两层调度系统和共享状态调度系统。分析了在 Docker 和容器编排管理器 Kubernetes 上构建的开源容器云平台 OpenShift 架构，其底层 Kubernetes 容器调度器的核心组件和调度原理。

### 2.1 Docker 虚拟化与 OpenShift 平台

#### 2.1.1 Docker 虚拟化技术

虚拟机是云计算的核心技术之一，以 Docker 为代表的容器虚拟化技术近几年大有取代虚拟机之势，逐步成为一种主流的技术。Docker 是一种操作系统层面的虚拟化技术，其底层是 LXC(Linux Container) 作为支撑。和传统的虚拟技术面向操作系统或虚拟硬件不同，Docker 是面向进程提供虚拟运行环境，其提供的虚拟环境就是容器。操作系统 Linux 可以为容器分配资源，如 CPU 时间、I/O 时间、内存、外设访问控制等，并通过内核控制组 (cgroups) 子系统限定特定的进程使用资源的量，然后让 Linux 内核的 namespace 隔离容器间的进程。这样就可以实现一个高级的容器引擎，开发者可以快速构建、部署和发布应用，并且实现较好的跨平台。从资源管理角度而言，Docker 依赖于 LXC、LXC 基于 cgroups 子系统，Docker 主要是对容器进行封装，管理容器的生命周期、查询和控制相关信息、而所有与操作系统的交互都是通过 libcontainer 容器引擎完成。



图 2.1 容器与虚拟机对比

图 2-1 中基础设施 **Infrastructure** 可以是个人电脑、服务器、云主机等，主机操作系统是运行在基础设施上的系统，最主要的是 **Linux** 各种版本，虚拟机管理系统 (**Hypervisor**) 可以实现在主机操作系统上独立运行多个子操作系统，在子操作系统上安装完应用所需的各种依赖后就可以实现资源应用的隔离。相对于虚拟机，**Docker** 要简便很多，当前所有的 **Linux** 版本以及 **MacOS**、**Windows** 都能运行 **Docker**，**Docker Engine** 取代了 **Hypervisor**，负载管理 **Docker** 容器并与操作系统通信，各种应用直接打包到镜像文件中，实现容器间的隔离。

对比 **Docker** 和虚拟机的架构发现，**Docker** 直接通过守护进程与操作系统进行通信，管理容器并进行资源分配，实现容器与主操作系统的隔离。没有臃肿的子操作系统，各容器直接与主操作系统共享资源，节约了大量的磁盘空间，其虚拟化开销极大缩小，应用启动时间甚至达到毫秒级，用户可以快速构建、部署和交付应用，并且具有较强的跨平台性。虽然 **Docker** 具有如此多的优势，但其隔离仅仅是在进程层面进行，并不能完全隔离整个运行环境。因此，用户需要根据自己的实际应用场景，需要彻底隔离用户的需求下选择虚拟机技术，如果仅是应用层面的隔离可以选择容器，如数据库、前端、后端等。

### 2.1.2 OpenShift 容器云平台

**Docker** 是当前主流的容器技术代表，**Kubernetes** 作为现阶段应用最为广泛的容器编排引擎，**OpenShift** 将这两种主流技术应用于企业，作为红帽公司提供的一款开源容器云平台。该平台底层以 **Docker** 作为容器引擎驱动，**Kubernetes** 作为容器编排组件，对外提供多种开发语言、中间件、数据库以及极易操作的用户界面、**DevOps(Development and Operations)** 工具等。允许开发者和开发团队在该平台上进行应用的构建、测试、部署以及发布，是一套完整的容器应用云平台。在该平台上可以运行和支持有状态和无状态的应用；为容器应用提供较强的安全防护，包括基于用户的访问控制、检查机制以及强制隔离措施；实现多种综合云原生服务，便于快速智能、灵活开发应用、构建各种分布式系统；支持多种云环境包括 **Amazon Web Service**、**Azure**、**Google** 云平台以及 **VMware** 等；为开发运维团队提供一个通用的平台和工具，保持持续的开发和测试。**OpenShift** 分为开源的社区版 **OpenShift Origin** 和收费的企业版 **OpenShift Enterprise**，本文实验主要在开源的 **OpenShift Origin** 上进行分析 and 测试。从技术堆栈的角度分析，**OpenShift** 自下而上可以划分为基层架构层、容器引擎层、容器编排层、**PaaS** 服务层、界面及工具层，如图 2.2 所示。下面分别对这几个层次进行介绍：

1. 基础架构层。**OpenShift** 运行所需的基础设施和环境，包括物理机、云主机、



虚拟机、各种公有云、私有云以及混合云等。OpenShift 支持多种操作系统，如 CentOS7 以上、Fedora21、Red Hat Enterprise Linux 等，最后专门针对 Atomic Host 进行支持，是对企业版的 Linux 进行定制和优化的操作系统，可以为应用提供高度一致的运行环境，保证集群的稳定和安全。容器应用虽然具有较强的跨平台型，其前提是要求底层操作系统的内核和配置必须一致，因为其隔离依赖于 Linux 的内核。

2. 容器引擎层。以当前主流的 Docker 作为 OpenShift 容器引擎，Docker 已广泛应用于各种社区和环境中，经过了安全、稳定和高可用的检验。OpenShift 并未修改任何原生的 Docker 代码，所有的应用最终到底层都生成一个 Docker 实例，只是将 Docker 的开放性和大量的镜像文件无缝衔接到平台上，对 Docker 的普通用户可以快速整合到平台中。
3. 容器编排层。容器的编排对容器云的性能和资源利用效率具有决定性作用，OpenShift 最终选择开源轻量的 Kubernetes 作为其容器编排引擎，Kubernetes 已在 Google 内部使用多年，其诞生初衷就是为解决大规模集群中容器的调度和管理问题。OpenShift 平台中很多基本的概念如 Namespace、Pod、Replication Controller 等都继承自 Kubernetes，OpenShift 同样只是将 Kubernetes 进行叠加使用，并未修改其原生代码和对象，用户依然可以通过原生的命令操作 Kubernetes 的对象。
4. PaaS 服务层。OpenShift 在 PaaS 服务层提供了多种开发语言、框架、数据库以及中间件，极大提升了上层应用的开发、部署和交付速度。OpenShift 有一个专门的社区以及 Docker Hub 提供各种应用的镜像，用户可以快速获取一个应用的基本镜像，构建自己所需的环，Red Hat 的 JBoss 中间件几乎全部实现了容器化。
5. 界面及工具层。OpenShift 平台强大的界面及工具极大帮助普通用户高效完成相关应用业务，用户可以通过 Web 进行鼠标操作，平台将自动从 Docker Hub 中拉取所需的镜像进行应用构建，全自动化的服务极大降低了运维成本和提升服务效率。此外，OpenShift 平台还提供 S2I(Source to Image) 服务，用户开发完成后可以自动整合到镜像中，快速实现交付，提升开发、测试、部署效率。针对用户端接入问题，平台提供 Web 控制台、IDE 集成、命令行工具、以及 RESTful API 编程接口，用户可以最大限度的自由发挥。



图 2.2 OpenShift Origin 架构图

如图 2.2 所示，OpenShift 平台的核心组件包括 Master、Node、Pod、Scheduler、Service、Storage 等。Master 是主控节点，可以配置高可用的多个主控节点，负责管理和维护 OpenShift 集群的状态。Master 上运行的 API Server 是其核心组件，所有用户的 Web Console 以及 RESTful API 服务都通过该组件进行访问认证控制，各 Node 节点也会定期轮询 API Server 更新其状态和容器的状态。Data Store 将所有的状态信息存储在分布式的数据库 Etcd 中，并通过 ceph 一致性协议保证其数据的一致性，Etcd 可以安装在主控节点，也可以单独安装到集群之外。Scheduler 调度控制器进行 Pod 资源的分配和调度，收集过各节点资源情况，选择最优的节点作为容器应用的调度目标。Replication Controller 异常自检测和恢复组件，负责监控集群中容器应用的状态和数量是否和用户要求一致，自启动和关闭容器应用满足用户的需求。Node 节点通过接收 Master 节点指令维护容器应用。Pod 是 OpenShift 平台调度器调度的最小单元，一些容器应用和应用之间往往存在较大的关联性，将几个联系紧密的容器部署在一个 Pod 中进行调度，提升应用的效率，如分布式数据库。容器是一个非持久化的对象，一旦容器重启或销毁，其状态信息将会随之销毁，集群每次给 Pod 分配的 IP 地址不同，要对外提供统一持久的服务，需要 Service 组件，该组件能将所有的信息转发到其对应的容器 IP 和端口上。此外，还有 Router、Persistent Storage、Registry、Haproxy、Kubelet 等都是集群的重要组成组件。数据的持久化存储可以是集群的数据库、分布式数据库或者其他的数据库中，当前支持的有 NFS、Ceph RDB、GlusterFS 等。

## 2.2 定理环境

给大家演示一下各种和证明有关的环境：

假设 2.1：待月西厢下，迎风户半开；隔墙花影动，疑是玉人来。

$$c = a^2 - b^2 \quad (2-1)$$

$$= (a + b)(a - b) \quad (2-2)$$

千辛万苦，历尽艰难，得有今日。然相从数千里，未曾衰戚。今将渡江，方图百年欢笑，如何反起悲伤？（引自《杜十娘怒沉百宝箱》）

定义 2.1：子曰：「道千乘之国，敬事而信，节用而爱人，使民以时。」

千古第一定义！问世间、情为何物，只教生死相许？天南地北双飞客，老翅几回寒暑。欢乐趣，离别苦，就中更有痴儿女。君应有语，渺万里层云，千山暮雪，只影向谁去？

横汾路，寂寞当年箫鼓，荒烟依旧平楚。招魂楚些何嗟及，山鬼暗谿风雨。天也妒，未信与，莺儿燕子俱黄土。千秋万古，为留待骚人，狂歌痛饮，来访雁丘处。

命题 2.1：曾子曰：「吾日三省吾身——为人谋而不忠乎？与朋友交而不信乎？传不习乎？」

多么凄美的命题啊！其日牛马嘶，新妇入青庐，奄奄黄昏后，寂寂人定初，我命绝今日，魂去尸长留，揽裙脱丝履，举身赴清池，府吏闻此事，心知长别离，徘徊庭树下，自挂东南枝。

注释 2.1：天不言自高，水不言自流。

$$\begin{aligned} \varphi(x, z) &= z - \gamma_{10}x - \gamma_{mn}x^m z^n \\ &= z - Mr^{-1}x - Mr^{-(m+n)}x^m z^n \end{aligned}$$

$$\zeta^0 = (\xi^0)^2, \quad (2-3)$$

$$\zeta^1 = \xi^0 \xi^1, \quad (2-4)$$

$$\zeta^2 = (\xi^1)^2, \quad (2-5)$$

天尊地卑，乾坤定矣。卑高以陈，贵贱位矣。动静有常，刚柔断矣。方以类聚，物以群分，吉凶生矣。在天成象，在地成形，变化见矣。鼓之以雷霆，润之以风雨，日月运行，一寒一暑，乾道成男，坤道成女。乾知大始，坤作成物。乾以易知，坤

以简能。易则易知，简则易从。易知则有亲，易从则有功。有亲则可久，有功则可大。可久则贤人之德，可大则贤人之业。易简，而天下矣之理矣；天下之理得，而成位乎其中矣。

公理 2.1： 两点间直线段距离最短。

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \quad (2-6)$$

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \quad (2-7)$$

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \quad (2-8)$$

《彖曰》：大哉乾元，万物资始，乃统天。云行雨施，品物流形。大明始终，六位时成，时乘六龙以御天。乾道变化，各正性命，保合大和，乃利贞。首出庶物，万国咸宁。

《象曰》：天行健，君子以自强不息。潜龙勿用，阳在下也。见龙再田，德施普也。终日乾乾，反复道也。或跃在渊，进无咎也。飞龙在天，大人造也。亢龙有悔，盈不可久也。用九，天德不可为首也。

引理 2.1：《猫和老鼠》是我最爱看的动画片。

$$\begin{aligned} & \int_a^b \left\{ \int_a^b [f(x)^2 g(y)^2 + f(y)^2 g(x)^2] - 2f(x)g(x)f(y)g(y) dx \right\} dy \\ &= \int_a^b \left\{ g(y)^2 \int_a^b f^2 + f(y)^2 \int_a^b g^2 - 2f(y)g(y) \int_a^b fg \right\} dy \end{aligned}$$

行行重行行，与君生别离。相去万余里，各在天一涯。道路阻且长，会面安可知。胡马依北风，越鸟巢南枝。相去日已远，衣带日已缓。浮云蔽白日，游子不顾返。思君令人老，岁月忽已晚。弃捐勿复道，努力加餐饭。

定理 2.1： 犯我强汉者，虽远必诛 ——陈汤（汉）

$$y = 1 \quad (2-9a)$$

$$y = 0 \quad (2-9b)$$

道可道，非常道。名可名，非常名。无名天地之始；有名万物之母。故常无，欲以观其妙；常有，欲以观其徼。此两者，同出而异名，同谓之玄。玄之又玄，众妙之门。上善若水。水善利万物而不争，处众人之所恶，故几于道。曲则全，枉则直，洼则盈，敝则新，少则多，多则惑。人法地，地法天，天法道，道法自然。知人者智，自知者明。胜人者有力，自胜者强。知足者富。强行者有志。不失其所者久。死而不亡者寿。

证明 燕赵古称多感慨悲歌之士。董生举进士，连不得志于有司，怀抱利器，郁郁适兹土，吾知其必有合也。董生勉乎哉？

夫以子之不遇时，苟慕义强仁者，皆爱惜焉，矧燕、赵之士出乎其性者哉！然吾尝闻风俗与化移易，吾恶知其今不异于古所云邪？聊以吾子之行卜之也。董生勉乎哉？

吾因子有所感矣。为我吊望诸君之墓，而观于其市，复有昔时屠狗者乎？为我谢曰：“明天子在上，可以出而仕矣！”——韩愈《送董邵南序》 □

推论 2.1： 四川话配音的《猫和老鼠》是世界上最好看最好听最有趣的动画片。

$$V_i = v_i - q_i v_j, \quad X_i = x_i - q_i x_j, \quad U_i = u_i, \quad \text{for } i \neq j; \quad (2-10)$$

$$V_j = v_j, \quad X_j = x_j, \quad U_j u_j + \sum_{i \neq j} q_i u_i. \quad (2-11)$$

迢迢牵牛星，皎皎河汉女。纤纤擢素手，札札弄机杼。终日不成章，泣涕零如雨。河汉清且浅，相去复几许。盈盈一水间，脉脉不得语。

例 2.1： 大家来看这个例子。

$$\begin{cases} \nabla f(\mathbf{x}^*) - \sum_{j=1}^p \lambda_j \nabla g_j(\mathbf{x}^*) = 0 \\ \lambda_j g_j(\mathbf{x}^*) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p. \end{cases} \quad (2-12)$$

练习 2.1： 请列出 Andrew S. Tanenbaum 和 W. Richard Stevens 的所有著作。

猜想 2.1： *Poincare Conjecture* If in a closed three-dimensional space, any closed curves can shrink to a point continuously, this space can be deformed to a sphere.

问题 2.1： 回答还是不回答，是个问题。

如何引用定理 2.1 呢？加上 \label 使用 \ref 即可。妾发初覆额，折花门前剧。郎骑竹马来，绕床弄青梅。同居长干里，两小无嫌猜。十四为君妇，羞颜未尝开。低头向暗壁，千唤不一回。十五始展眉，愿同尘与灰。常存抱柱信，岂上望夫台。十六君远行，瞿塘滟滪堆。五月不可触，猿声天上哀。门前迟行迹，一一生绿苔。苔深不能扫，落叶秋风早。八月蝴蝶来，双飞西园草。感此伤妾心，坐愁红颜老。

## 2.3 参考文献

当然参考文献可以直接写 `\bibitem`，虽然费点功夫，但是好控制，各种格式可以自己随意改写。

本模板推荐使用 **BIB<sub>T</sub>E<sub>X</sub>**，分别提供数字引用 (`thuthesis-numeric.bst`) 和作者年份引用 (`thuthesis-author-year.bst`) 样式，基本符合学校的参考文献格式（如专利等引用未加详细测试）。看看这个例子，关于书的<sup>[1-3]</sup>，还有这些<sup>[4-6]</sup>，关于杂志的<sup>[7-9]</sup>，硕士论文<sup>[10-11]</sup>，博士论文<sup>[12-13]</sup>，标准文件<sup>[14]</sup>，会议论文<sup>[15-16]</sup>，技术报告<sup>[17]</sup>，电子文献<sup>[18-19]</sup>。中文参考文献<sup>[20]</sup> 应增加 `language="chinese"` 字段，以便进行相应处理。另外，本模板对中文文献<sup>[21]</sup> 的支持并不是十全十美，如果有不如意的地方，请手动修改 `bb1` 文件。

有时候不想要上标，那么可以这样 [12]，这个非常重要。

有时候一些参考文献没有纸质出处，需要标注 **URL**。缺省情况下，**URL** 不会在连字符处断行，这可能使得用连字符代替空格的网址分行很难看。如果需要，可以将模板类文件中

```
\RequirePackage{hyperref}
```

一行改为：

```
\PassOptionsToPackage{hyphens}{url}
```

```
\RequirePackage{hyperref}
```

使得连字符处可以断行。更多设置可以参考 `url` 宏包文档。

## 2.4 公式

贝叶斯公式如式 (2-13)，其中  $p(y|\mathbf{x})$  为后验； $p(\mathbf{x})$  为先验；分母  $p(\mathbf{x})$  为归一化因子。

$$p(y|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, y)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x}|y)p(y)}{p(\mathbf{x})} \quad (2-13)$$

论文里面公式越多，**T<sub>E</sub>X** 就越 happy。再看一个 `amsmath` 的例子：

$$\det \mathbf{K}(t = 1, t_1, \dots, t_n) = \sum_{I \in \mathbf{n}} (-1)^{|I|} \prod_{i \in I} t_i \prod_{j \in I} (D_j + \lambda_j t_j) \det \mathbf{A}^{(I)}(\bar{I}|\bar{I}) = 0. \quad (2-14)$$

前面定理示例部分列举了很多公式环境，可以说把常见的情况都覆盖了，大家在写公式的时候一定要好好看 `amsmath` 的文档，并参考模板中的用法：

$$\begin{aligned}
 & \int_a^b \left\{ \int_a^b [f(x)^2 g(y)^2 + f(y)^2 g(x)^2] - 2f(x)g(x)f(y)g(y) dx \right\} dy \\
 & = \int_a^b \left\{ g(y)^2 \int_a^b f^2 + f(y)^2 \int_a^b g^2 - 2f(y)g(y) \int_a^b fg \right\} dy
 \end{aligned}$$

其实还可以看看这个多级规划：

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_x F(x, y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*) \\ \text{subject to:} \\ G(x) \leq 0 \\ (y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*) \text{ solves problems } (i = 1, 2, \dots, m) \\ \left\{ \begin{array}{l} \max_{y_i} f_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \text{subject to:} \\ g_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \leq 0. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (2-15)$$

这些跟规划相关的公式都来自于刘宝碁老师《不确定规划》的课件。

## 第3章 中华人民共和国

### 3.1 其它例子

在第2章中我们学习了贝叶斯公式 (2-13)，这里我们复习一下：

$$p(y|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, y)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x}|y)p(y)}{p(\mathbf{x})} \quad (3-1)$$

#### 3.1.1 绘图

本模板不再预先装载任何绘图包（如 `pstricks`，`pgf` 等），完全由用户来决定。个人觉得 `pgf` 不错，不依赖于 `Postscript`。此外还有很多针对 `LaTeX` 的 GUI 作图工具，如 `XFig(jFig)`，`WinFig`，`Tpx`，`Ipe`，`Dia`，`Inkscape`，`LaTeXPiX`，`jPicEdt`，`jaxdraw` 等等。

#### 3.1.2 插图

强烈推荐《`LaTeX 2ε` 插图指南》！关于子图形的使用细节请参看 `subcaption` 宏包的说明文档。

##### 3.1.2.1 一个图形

一般图形都是处在浮动环境中。之所以称为浮动是指最终排版效果图形的位置不一定与源文件中的位置对应<sup>①</sup>，这也是刚使用 `LaTeX` 同学可能遇到的问题。如果要强制固定浮动图形的位置，请使用 `float` 宏包，它提供了 `[H]` 参数，比如图 3.1。



图 3.1 利用 `Xfig` 制图

大学之道，在明明德，在亲民，在止于至善。知止而后有定；定而后能静；静而后能安；安而后能虑；虑而后能得。物有本末，事有终始。知所先后，则近道矣。古之欲明明德于天下者，先治其国；欲治其国者，先齐其家；欲齐其家者，先修其身；欲修其身者，先正其心；欲正其心者，先诚其意；欲诚其意者，先致其知；致

<sup>①</sup> This is not a bug, but a feature of `LaTeX`!



知在格物。物格而后知至；知至而后意诚；意诚而后心正；心正而后身修；身修而后家齐；家齐而后国治；国治而后天下平。自天子以至于庶人，壹是皆以修身为本。其本乱而未治者否矣。其所厚者薄，而其所薄者厚，未之有也！

——《大学》

### 3.1.2.2 多个图形

如果多个图形相互独立，并不共用一个图形计数器，那么用 `minipage` 或者 `parbox` 就可以。否则，请参看图 3.2，它包含两个小图，分别是图 3.2(a)和图 3.2(b)。推荐使用 `\subcaptionbox`，因为可以像图 3.2 那样对齐子图的标题，也可以使用 `subcaption` 宏包的 `\subcaption`（放在 `minipage` 中，用法同 `\caption`）或是 `subfigure`、`subtable` 环境，像图 3.3，不要再用 `\subfloat`、`\subfigure` 和 `\subtable`。



(a) 第一个小图形



(b) 第二个小图形，注意这个图略矮些。如果标题很长的话，它会自动换行

图 3.2 包含子图形的大图形 (`subcaptionbox` 示例)



(a) 第一个小图形



(b) 第二个小图形，注意这个图略矮些。`subfigure` 中同一行的子图在顶端对齐。

图 3.3 包含子图形的大图形 (`subfigure` 示例)

古之学者必有师。师者，所以传道受业解惑也。人非生而知之者，孰能无惑？惑而不从师，其为惑也，终不解矣。生乎吾前，其闻道也固先乎吾，吾从而师之；



图 3.4 并排第一个图



图 3.5 并排第二个图

生乎吾後，其闻道也亦先乎吾，吾从而师之。吾师道也，夫庸知其年之先後生於吾乎！是故无贵无贱无长无少，道之所存，师之所存也。

嗟乎！师道之不传也久矣，欲人之无惑也难矣。古之圣人，其出人也远矣，犹且从师而问焉；今之众人，其下圣人也亦远矣，而耻学於师。是故圣益圣，愚益愚。圣人之所以为圣，愚人之所以为愚，其皆出於此乎？爱其子，择师而教之，於其身也，则耻师焉，惑焉。彼童子之师，授之书而习其句读者，非吾所谓传其道、解其惑者也。句读之不知，惑之不解，或师焉，或不焉，小学而大遗，吾未见其明也。巫医、乐师、百工之人不耻相师，士大夫之族曰“师”曰“弟子”之云者，则群聚而笑之。问之，则曰：彼与彼年相若也，道相似也，位卑则足羞，官盛则近谀。呜呼！师道之不复，可知矣。巫医、乐师、百工之人。吾子不齿，今其智乃反不能及，其可怪也欤！圣人无常师。孔子师郯子、苌子、师襄、老聃。郯子之徒，其贤不及孔子。孔子曰：“三人行，必有我师。”是故弟子不必不如师，师不必贤於弟子。闻道有先後，术业有专攻，如是而已。

如果要把编号的两个图形并排，那么小页就非常有用：

李氏子蟠，年十七，好古文、六艺，经传皆通习之，不拘於时，学於余。余嘉其能行古道，作师说以贻之。

——韩愈（唐）

## 插图索引

图 2.1	容器与虚拟机对比 .....	5
图 2.2	OpenShift Origin 架构图 .....	8
图 3.1	利用 Xfig 制图 .....	14
图 3.2	包含子图形的大图形 (subcaptionbox 示例) .....	15
图 3.3	包含子图形的大图形 (subfigure 示例) .....	15
图 3.4	并排第一个图 .....	16
图 3.5	并排第二个图 .....	16

## 表格索引

## 公式索引

公式 2-1 .....	9
公式 2-2 .....	9
公式 2-3 .....	9
公式 2-4 .....	9
公式 2-5 .....	9
公式 2-6 .....	10
公式 2-7 .....	10
公式 2-8 .....	10
公式 2-9a .....	10
公式 2-9b .....	10
公式 2-10 .....	11
公式 2-11 .....	11
公式 2-12 .....	11
公式 2-13 .....	12
公式 2-14 .....	12
公式 2-15 .....	13
公式 3-1 .....	14
公式 A-1 .....	24
公式 A-2 .....	25

## 参考文献

- [1] Knuth D E. The  $\text{\TeX}$  book[M]. 15th ed. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [2] Goosens M, Mittelbach F, Samarin A. The  $\text{\LaTeX}$  companion[M]. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1994: 112-125
- [3] Gröning P, Nilsson L, Ruffieux P, et al. Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology: volume 1[M]. [S.l.]: American Scientific Publishers, 2004: 547-579
- [4] Krasnogor N. Towards robust memetic algorithms[M]//Hart W, Krasnogor N, Smith J. Studies in Fuzziness and Soft Computing: volume 166 Recent Advances in Memetic Algorithms. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2004: 185-207
- [5] 阎真. 沧浪之水[M]. [出版地不详]: 人民文学出版社, 2001: 185-207
- [6] 班固. 苏武传[M]//郑在瀛, 汪超宏, 周文复. 新古文观止丛书: 第 2 卷 传记散文英华. 武汉: 湖北人民出版社, 1998: 65-69
- [7] Chafik El Idrissi M, Roney A, Frigon C, et al. Measurements of total kinetic-energy released to the  $N = 2$  dissociation limit of  $\text{H}_2$  — evidence of the dissociation of very high vibrational Rydberg states of  $\text{H}_2$  by doubly-excited states[J]. Chemical Physics Letters, 1994, 224(10): 260-266.
- [8] Mellinger A, Vidal C R, Jungen C. Laser reduced fluorescence study of the carbon-monoxide and triplet Rydberg series-experimental results and multichannel quantum-defect analysis[J]. J. Chem. Phys., 1996, 104(5): 8913-8921.
- [9] Shell M. How to use the IEEEtran  $\text{\LaTeX}$  class[J]. Journal of  $\text{\LaTeX}$  Class Files, 2002, 12(4): 100-120.
- [10] 猪八戒. 论流体食物的持久保存[硕士学位论文]. 北京: 广寒宫大学, 2005.
- [11] Jeyakumar A R. Metamori: A library for incremental file checkpointing[D]. Blacksburg: Virginia Tech, 2004.
- [12] 沙和尚. 论流沙河的综合治理[博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2005.
- [13] Zadok E. FiST: A System for Stackable File System Code Generation[D]. USA: Computer Science Department, Columbia University, 2001.
- [14] IEEE Std 1363-2000. IEEE standard specifications for public-key cryptography[M]. New York: IEEE, 2000
- [15] Kim S, Woo N, Yeom H Y, et al. Design and Implementation of Dynamic Process Management for Grid-enabled MPICH[C]//the 10th European PVM/MPI Users' Group Conference. Venice, Italy: [s.n.], 2003.
- [16] Kocher C, Jaffe J, Jun B. Differential power analysis[C]//Wiener M. Lecture Notes in Computer Science: volume 1666 Advances in Cryptology (CRYPTO '99). [S.l.]: Springer-Verlag, 1999: 388-397.
- [17] Woo A, Bailey D, Yarrow M, et al. The NAS parallel benchmarks 2.0[R/OL]. The Pennsylvania State University CiteSeer Archives, 1995. <http://www.nasa.org/>.
- [18] 萧钰. 出版业信息化迈入快车道[EB/OL]. <http://www.creader.com/news/200112190019.htm>.

- [19] Online Computer Library Center, Inc. History of OCLC[EB/OL]. <http://www.oclc.org/about/history/default.htm>.
- [20] 贾宝玉, 林黛玉, 薛宝钗, 等. 论刘姥姥食量大如牛之现实意义[J]. 红楼梦杂谈, 1800, 224: 260-266.
- [21] 王重阳, 黄药师, 欧阳峰, 等. 武林高手从入门到精通[C]//第  $N$  次华山论剑. 西安, 中国: [出版者不详], 2006.
- [22] 薛瑞尼. THUTHESIS: 清华大学学位论文模板[EB/OL]. 2017. <https://github.com/xueruini/thuthesis>.

## 致 谢

衷心感谢导师 xxx 教授和物理系 xxx 副教授对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

在美国麻省理工学院化学系进行九个月的合作研究期间，承蒙 xxx 教授热心指导与帮助，不胜感激。感谢 xx 实验室主任 xx 教授，以及实验室全体老师和同学们的热情帮助和支持！本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

感谢 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 和 THU<sup>THE</sup>SIS<sup>[22]</sup>，帮我节省了不少时间。



## 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 外文资料原文

The title of the English paper

**Abstract:** As one of the most widely used techniques in operations research, *mathematical programming* is defined as a means of maximizing a quantity known as *objective function*, subject to a set of constraints represented by equations and inequalities. Some known subtopics of mathematical programming are linear programming, nonlinear programming, multiobjective programming, goal programming, dynamic programming, and multilevel programming<sup>[1]</sup>.

It is impossible to cover in a single chapter every concept of mathematical programming. This chapter introduces only the basic concepts and techniques of mathematical programming such that readers gain an understanding of them throughout the book<sup>[2,3]</sup>.

## A.1 Single-Objective Programming

The general form of single-objective programming (SOP) is written as follows,

$$\begin{cases} \max f(x) \\ \text{subject to:} \\ g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (123)$$

which maximizes a real-valued function  $f$  of  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  subject to a set of constraints.

**Definition A.1:** In SOP, we call  $x$  a decision vector, and  $x_1, x_2, \dots, x_n$  decision variables. The function  $f$  is called the objective function. The set

$$S = \{x \in \mathbb{R}^n \mid g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, p\} \quad (456)$$

is called the feasible set. An element  $x$  in  $S$  is called a feasible solution.

**Definition A.2:** A feasible solution  $x^*$  is called the optimal solution of SOP if and only if

$$f(x^*) \geq f(x) \quad (\text{A-1})$$

for any feasible solution  $x$ .

One of the outstanding contributions to mathematical programming was known as the Kuhn-Tucker conditions A-2. In order to introduce them, let us give some definitions. An inequality constraint  $g_j(x) \leq 0$  is said to be active at a point  $x^*$  if  $g_j(x^*) = 0$ . A point  $x^*$  satisfying  $g_j(x^*) \leq 0$  is said to be regular if the gradient vectors  $\nabla g_j(x)$  of all active constraints are linearly independent.

Let  $x^*$  be a regular point of the constraints of SOP and assume that all the functions  $f(x)$  and  $g_j(x), j = 1, 2, \dots, p$  are differentiable. If  $x^*$  is a local optimal solution, then there exist Lagrange multipliers  $\lambda_j, j = 1, 2, \dots, p$  such that the following Kuhn-Tucker conditions hold,

$$\begin{cases} \nabla f(x^*) - \sum_{j=1}^p \lambda_j \nabla g_j(x^*) = 0 \\ \lambda_j g_j(x^*) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p. \end{cases} \quad (\text{A-2})$$

If all the functions  $f(x)$  and  $g_j(x), j = 1, 2, \dots, p$  are convex and differentiable, and the point  $x^*$  satisfies the Kuhn-Tucker conditions (A-2), then it has been proved that the point  $x^*$  is a global optimal solution of SOP.

### A.1.1 Linear Programming

If the functions  $f(x), g_j(x), j = 1, 2, \dots, p$  are all linear, then SOP is called a *linear programming*.

The feasible set of linear is always convex. A point  $x$  is called an extreme point of convex set  $S$  if  $x \in S$  and  $x$  cannot be expressed as a convex combination of two points in  $S$ . It has been shown that the optimal solution to linear programming corresponds to an extreme point of its feasible set provided that the feasible set  $S$  is bounded. This fact is the basis of the *simplex algorithm* which was developed by Dantzig as a very efficient method for solving linear programming.

Roughly speaking, the simplex algorithm examines only the extreme points of the feasible set, rather than all feasible points. At first, the simplex algorithm selects an extreme point as the initial point. The successive extreme point is selected so as to improve the objective function value. The procedure is repeated until no improvement in objective function value can be made. The last extreme point is the optimal solution.

Table 1 This is an example for manually numbered table, which would not appear in the list of tables

Network Topology		# of nodes	# of clients			Server
GT-ITM	Waxman Transit-Stub	600	2%	10%	50%	Max. Connectivity
Inet-2.1		6000				
Xue	Rui	Ni	THUThESIS			
	ABCDEF					

### A.1.2 Nonlinear Programming

If at least one of the functions  $f(x)$ ,  $g_j(x)$ ,  $j = 1, 2, \dots, p$  is nonlinear, then SOP is called a *nonlinear programming*.

A large number of classical optimization methods have been developed to treat special-structural nonlinear programming based on the mathematical theory concerned with analyzing the structure of problems.



Figure 1 This is an example for manually numbered figure, which would not appear in the list of figures

Now we consider a nonlinear programming which is confronted solely with maximizing a real-valued function with domain  $\mathcal{R}^n$ . Whether derivatives are available or not, the usual strategy is first to select a point in  $\mathcal{R}^n$  which is thought to be the most likely place where the maximum exists. If there is no information available on which to base such a selection, a point is chosen at random. From this first point an attempt is made to construct a sequence of points, each of which yields an improved objective function value over its predecessor. The next point to be added to the sequence is chosen by analyzing the behavior of the function at the previous points. This construction continues until some termination criterion is met. Methods based upon this strategy are called *ascent methods*, which can be classified as *direct methods*, *gradient methods*, and *Hessian methods* according to the information about the behavior of objective function  $f$ . Direct methods require only that the function can be evaluated at each point. Gradient methods require the evaluation of first derivatives of  $f$ . Hessian methods require the evaluation of second

derivatives. In fact, there is no superior method for all problems. The efficiency of a method is very much dependent upon the objective function.

### A.1.3 Integer Programming

*Integer programming* is a special mathematical programming in which all of the variables are assumed to be only integer values. When there are not only integer variables but also conventional continuous variables, we call it *mixed integer programming*. If all the variables are assumed either 0 or 1, then the problem is termed a *zero-one programming*. Although integer programming can be solved by an *exhaustive enumeration* theoretically, it is impractical to solve realistically sized integer programming problems. The most successful algorithm so far found to solve integer programming is called the *branch-and-bound enumeration* developed by Balas (1965) and Dakin (1965). The other technique to integer programming is the *cutting plane method* developed by Gomory (1959).

*Uncertain Programming* (BaoDing Liu, 2006.2)

## References

*NOTE: These references are only for demonstration. They are not real citations in the original text.*

- [1] Donald E. Knuth. The T<sub>E</sub>Xbook. Addison-Wesley, 1984. ISBN: 0-201-13448-9
- [2] Paul W. Abrahams, Karl Berry and Kathryn A. Hargreaves. T<sub>E</sub>X for the Impatient. Addison-Wesley, 1990. ISBN: 0-201-51375-7
- [3] David Salomon. The advanced T<sub>E</sub>Xbook. New York : Springer, 1995. ISBN:0-387-94556-3

## 附录 B 外文资料的调研阅读报告或书面翻译

### 英文资料的中文标题

**摘要：**本章为外文资料翻译内容。如果有摘要可以直接写上来，这部分好像没有明确的规定。

### B.1 单目标规划

北冥有鱼，其名为鲲。鲲之大，不知其几千里也。化而为鸟，其名为鹏。鹏之背，不知其几千里也。怒而飞，其翼若垂天之云。是鸟也，海运则将徙于南冥。南冥者，天池也。

$$p(y|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, y)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x}|y)p(y)}{p(\mathbf{x})} \quad (123)$$

吾生也有涯，而知也无涯。以有涯随无涯，殆已！已而为知者，殆而已矣！为善无近名，为恶无近刑，缘督以为经，可以保身，可以全生，可以养亲，可以尽年。

#### B.1.1 线性规划

庖丁为文惠君解牛，手之所触，肩之所倚，足之所履，膝之所倚，砉然响然，奏刀騞然，莫不中音，合于桑林之舞，乃中经首之会。

表 1 这是手动编号但不出现在索引中的一个表格例子

Network Topology		# of nodes	# of clients			Server
GT-ITM	Waxman Transit-Stub	600	2%	10%	50%	Max. Connectivity
Inet-2.1		6000				
Xue	Rui	Ni	THUThESIS			
	ABCDEF					

文惠君曰：“嘻，善哉！技盖至此乎？”庖丁释刀对曰：“臣之所好者道也，进乎技矣。始臣之解牛之时，所见无非全牛者；三年之后，未尝见全牛也；方今之时，臣以神遇而不以目视，官知止而神欲行。依乎天理，批大郤，导大窾，因其固然。技经肯綮之未尝，而况大瓠乎！良庖岁更刀，割也；族庖月更刀，折也；今臣之刀十九年矣，所解数千牛矣，而刀刃若新发于硎。彼节者有间而刀刃者无厚，以无厚入有间，恢恢乎其于游刃必有余地矣。是以十九年而刀刃若新发于硎。虽然，每至

于族，吾见其难为，怵然为戒，视为止，行为迟，动刀甚微，謦然已解，如土委地。提刀而立，为之而四顾，为之踌躇满志，善刀而藏之。”

文惠君曰：“善哉！吾闻庖丁之言，得养生焉。”

### B.1.2 非线性规划

孔子与柳下季为友，柳下季之弟名曰盗跖。盗跖从卒九千人，横行天下，侵暴诸侯。穴室枢户，驱人牛马，取人妇女。贪得忘亲，不顾父母兄弟，不祭先祖。所过之邑，大国守城，小国入保，万民苦之。孔子谓柳下季曰：“夫为人父者，必能诏其子；为人兄者，必能教其弟。若父不能诏其子，兄不能教其弟，则无贵父子兄弟之亲矣。今先生，世之才士也，弟为盗跖，为天下害，而弗能教也，丘窃为先生羞之。丘请为先生往说之。”



图 1 这是手动编号但不出现索引中的图片的例子

柳下季曰：“先生言为人父者必能诏其子，为人兄者必能教其弟，若子不听父之诏，弟不受兄之教，虽今先生之辩，将奈之何哉？且跖之为人也，心如涌泉，意如飘风，强足以距敌，辩足以饰非。顺其心则喜，逆其心则怒，易辱人以言。先生必无往。”

孔子不听，颜回为驭，子贡为右，往见盗跖。

### B.1.3 整数规划

盗跖乃方休卒徒大山之阳，脍人肝而脯之。孔子下车而前，见谒者曰：“鲁人孔丘，闻将军高义，敬再拜谒者。”谒者入通。盗跖闻之大怒，目如明星，发上指冠，曰：“此夫鲁国之巧伪人孔丘非邪？为我告之：尔作言造语，妄称文、武，冠枝木之冠，带死牛之胁，多辞缪说，不耕而食，不织而衣，摇唇鼓舌，擅生是非，以迷天下之主，使天下学士不反其本，妄作孝弟，而侥幸于封侯富贵者也。子之罪大极重，疾走归！不然，我将以子肝益昼脯之膳。”

## 附录 C 其它附录

前面两个附录主要是给本科生做例子。其它附录的内容可以放到这里，当然如果你愿意，可以把这部分也放到独立的文件中，然后将其 `\input` 到主文件中。



## 个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历

xxxx 年 xx 月 xx 日出生于 xx 省 xx 县。

xxxx 年 9 月考入 xx 大学 xx 系 xx 专业, xxxx 年 7 月本科毕业并获得 xx 学士学位。

xxxx 年 9 月免试进入 xx 大学 xx 系攻读 xx 学位至今。

### 发表的学术论文

- [1] Yang Y, Ren T L, Zhang L T, et al. Miniature microphone with silicon- based ferroelectric thin films. Integrated Ferroelectrics, 2003, 52:229-235. (SCI 收录, 检索号:758FZ.)
- [2] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 硅基铁电微声学器件中薄膜残余应力的研究. 中国机械工程, 2005, 16(14):1289-1291. (EI 收录, 检索号:0534931 2907.)
- [3] 杨轶, 张宁欣, 任天令, 等. 集成铁电器件中的关键工艺研究. 仪器仪表学报, 2003, 24(S4):192-193. (EI 源刊.)
- [4] Yang Y, Ren T L, Zhu Y P, et al. PMUTs for handwriting recognition. In press. (已被 Integrated Ferroelectrics 录用. SCI 源刊.)
- [5] Wu X M, Yang Y, Cai J, et al. Measurements of ferroelectric MEMS microphones. Integrated Ferroelectrics, 2005, 69:417-429. (SCI 收录, 检索号:896KM)
- [6] 贾泽, 杨轶, 陈兢, 等. 用于压电和电容麦克风的体硅腐蚀相关研究. 压电与声光, 2006, 28(1):117-119. (EI 收录, 检索号:06129773469)
- [7] 伍晓明, 杨轶, 张宁欣, 等. 基于 MEMS 技术的集成铁电硅微麦克风. 中国集成电路, 2003, 53:59-61.

### 研究成果

- [1] 任天令, 杨轶, 朱一平, 等. 硅基铁电微声学传感器畴极化区域控制和电极连接的方法: 中国, CN1602118A. (中国专利公开号)

- [2] Ren T L, Yang Y, Zhu Y P, et al. Piezoelectric micro acoustic sensor based on ferroelectric materials: USA, No.11/215, 102. (美国发明专利申请号)

综合论文训练记录表

学生姓名		学号		班级	
论文题目					
主要内容以及进度安排	<div>指导教师签字：_____</div> <div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				
中期考核意见	<div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				

指导教师评语	<div>指导教师签字：_____</div> <div>年      月      日</div>
评阅教师评语	<div>评阅教师签字：_____</div> <div>年      月      日</div>
答辩小组评语	<div>答辩小组组长签字：_____</div> <div>年      月      日</div>

总成绩：\_\_\_\_\_

教学负责人签字：\_\_\_\_\_

年      月      日