

论文题目：支持可编程数据平面的网络模拟器设计与开发

学生姓名：况鹏

指导教师：毕军、赵鹏

摘 要

从网络模拟器角度写：

网络模拟广泛应用于网络研究、教育、工业的各个方面，然而在进行网络模拟之前，传统的网络模拟器需要开发网络模拟行为模型，而这需要开发人员熟悉网络模拟器内部运行机制、函数库等。此外，由于开发的网络模拟行为模型紧密耦合于模拟器内部实现，导致开发代码不能直接迁移到真实的网络设备。最近，新兴起的以 P4 为主流的可编程数据平面技术允许操作员直接定义网络设备的行为逻辑而不用考虑网络设备的底层实现机制，正逐渐地引起学术界和工业界的关注。

受到可编程数据平面技术的驱动，我们提出 NS4，一个支持可编程数据平面技术的网络模拟器。NS4 通过将 P4 整合到传统网络模拟器 ns3 中，充分利用 P4 协议无关性、目标独立性优势，简化了网络模拟行为模型的开发，解除了开发代码与模拟器内部实现耦合性，使得开发代码能直接迁移到真实网络设备上，解决了传统网络模拟器存在的问题。此外，不同于网络仿真器，NS4 进行模拟过程中，占用系统资源有限，可为 P4 程序的有效性以及实现性能提供大规模网络拓扑级别的模拟测试。

在这篇文章中，我们设计并实现了 NS4，它由用于处理数据包行为的数据平面模块以及用于与 P4 流水线交互的控制平面模块组成。我们构建了 NS3 与 NS4 延迟对比实验、大规模 Fattree 网络拓扑测试实验来评估 NS4 有效性，通过使用 P4 和 C++ 开发几个有代表性网络应用程序来衡量 NS4 的开发复杂度，通过展现 SilkRoad 案例来评估 NS4 可用性。实验结果表明 NS4 能够以较小的代价模拟大规模的 P4 驱动的网络。

从可编程数据平面角度写：

以 P4 为主流的可编程数据平面技术通过对数据包解析、处理行为进行编程，可快速支持网络新协议的设计以及新应用的开发等，在促进网络创新等方面发挥着重要作用，然而，随着 P4 程序种类、数量增加，对 P4 程序有效性及实现性能进行测试正逐渐地引起学术界和工业界的关注。

现有的 P4 程序的网络仿真软件如 Mininet、BMv2、P4Runtime 等受到仿真系统硬件资源的限制，难以扩展到大规模网络拓扑级别，导致无法对 P4 程序在大规模拓扑下进行测试。怎么引出 ns3

关 键 词：网络模拟；P4；可编程数据平面

Title: XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

Name: XXXXX

Supervisor: XXXXX

ABSTRACT

英文摘要的内容、格式和字号必须与中文摘要一致。

居中编排“ABSTRACT”（三号 Times New Roman）。

摘要正文，英文每段开头左对齐顶格编排，段与段之间空一行。小四号字。

The key parts in drip irrigation facilities are emitters. The structural design parameters of emitters can directly affect its performance and the function of the whole drip irrigation system

1. Because.....

2. Only

3. To support

KEY WORDS: XXX; XXX; XXX; XXX; XXX

每个关键词组的第一个字母大写，其余为小写，每一关键词之间用分号隔开，最后一个关键词后无标点符号。例如：Drip irrigation emitter; RP&M; Hydraulics; Labyrinth flow channel

目 录

1 绪论.....	5
1.1 标题 2.....	7
1.1.1 标题 3.....	错误!未定义书签。
2 XX（标题 1）	8
2.1 标题 2.....	8
2.1.1 标题 3.....	错误!未定义书签。
3 XXX（标题 1）	错误!未定义书签。
3.1 标题 2.....	错误!未定义书签。
3.1.1 标题 3.....	错误!未定义书签。
4 XXXX（标题 1）	12
4.1 标题 2.....	错误!未定义书签。
4.1.1 标题 3.....	错误!未定义书签。
5 XXXXX（标题 1）	13
5.1 标题 2.....	错误!未定义书签。
5.1.1 标题 3.....	错误!未定义书签。
6 XXXXXX（标题 1）	错误!未定义书签。
6.1 标题 2.....	错误!未定义书签。
6.1.1 标题 3.....	错误!未定义书签。
7 XXXXXXXX（标题 1）	15
7.1 标题 2.....	错误!未定义书签。
7.1.1 标题 3.....	错误!未定义书签。
8 XXXXXXXXX（标题 1）	错误!未定义书签。
8.1 标题 2.....	错误!未定义书签。
8.1.1 标题 3.....	16
9 XXXXXXXXXX（标题 1）	错误!未定义书签。
9.1 标题 2.....	16
9.1.1 标题 3.....	16
10 XXXXXXXXXXXX（标题 1）	16
10.1 标题 2.....	16
10.1.1 标题 3.....	16
11 XXXXXXXXXXXXXX（标题 1）	17
11.1 标题 2.....	17
11.1.1 标题 3.....	17

12 结论与展望	17
12.1 标题 2.....	18
12.1.1 标题 3.....	18
致 谢.....	19
参考文献.....	20
附 录.....	24

1 绪论

随着互联网规模的不断增长，网络架构变得越来越复杂，新的网络协议以及网络功能越来越难以直接部署在实际网络中进行测试和验证。因此，学术界和工业界设计了很多网络模拟系统用于对网络协议和网络功能的有效性和性能进行评估。

现有的网络模拟系统有 OPNet、REAL、PFPSim、ns 等。OPNet[1]是面向对象的通用目的网络模拟器，它使用动态进程分配技术构建虚拟电路传输模型，以便进行离散事件的模拟，它基于 Proto-C 语言，可实现几乎所有网络功能及协议，它除了规范模拟开发环境外，还为网络模拟提供了图形化的 GUI 界面。REAL[2]是一个用于研究流动态行为以及拥塞控制的网络模拟器，它使用 NetLanguage 描述网络拓扑、协议、数据和控制参数，目前已提供 30 多个模块来进行流控制协议的模拟。PFPSim[3]是一个基于可编程转发平面结构的、用于数据包处理应用程序分析和验证的网络模拟器，使用转发结构描述语言（FAD）定义转发设备体系结构，使用 C++或 P4 定义应用程序代码，它关注的是转发设备体系结构的建模。Crys-talNet[102] 是一个具有极高可扩展性的网络模拟器，它能够模拟数千个网络设备。ns 模拟工具集，由 ns1、ns2[29]、ns3[103]组成，是由不同团体和组织开发的一套基于离散事件的开源网络模拟器。其中 ns3 由 C++、Python 编写，广泛用于网络研究和教学领域，里面包含了大量由开源社区人员开发的扩展插件，可支持很多网络场景[104-106]。

在上述网络模拟系统中，ns3 应用最为广泛，操作员在使用 ns3 进行网络模拟时，需要遵循以下几个步骤：首先，根据网络协议或网络实体的设计需求开发一个网络行为模型作为模拟器的内部模块。其次，根据实际场景需要搭建网络拓扑，定义模拟过程网络任务。然后，设置模拟时间，激发网络模拟，验证模拟行为是否与预期一致。最后，当模拟行为符合预期时，需要重写模拟代码，部署到测试床或厂商设备。在这样的过程之中，网络模拟器 ns3 存在着几个重要问题：

D1: 开发网络模拟行为模型是一项耗时、费劲的工作。它需要开发人员熟悉网络模拟器的内部运行机制、函数库等，而这不可避免地带来了不小的学习负担。

D2: 开发的模拟代码很难迁移到真实的网络设备。由于开发的代码是由 C++编写的，大量依赖于模拟器提供的函数库，而真实网络设备很多都是用硬件描述语言（如 VHDL、Verilog）或集成电路领域中的 FPGA、ASIC 开发设计的，导致开发代码不能直接迁移到真实的网络设备，而这不可避免地带来了代码转化的过程，增加了大量重复性工作，也增大了程序出错的机率。

D1 和 D2 的本质在于网络模拟行为模型的实现紧耦合于模拟器内部结构机制，所以迫切地需要一种解除它们之间耦合性的方法。最近，新兴起的以 P4 为主流的可编程数据平面技术提供了底层设备的抽象转发模型，允许操作员直接定义网络设备行

为逻辑而不用考虑底层设备的实现细节，似乎为解除网络模拟行为模型与模拟器平台之间耦合性提供了一个可行的方法。

受到这个想法的启发，本文提出了 NS4，一个由 P4 驱动的，支持大规模网络拓扑构建的网络模拟器。通过将 P4 整合到 ns3 中，NS4 解除了行为模型与潜在模拟平台之间的耦合性。正如表 1 所示，NS4 通过 P4 定义网络模拟行为模型，不需借助任何模拟器内部函数库（D1 解决办法），此外，由于 P4 具有目标独立性优势，使得 P4 开发的行为模型可直接移植到支持 P4 的网络设备，这样避免了大量代码重写的工作（D2 解决办法）。另外由于 NS4 是基于 ns3 网络模拟平台，不同于网络仿真器，消耗系统资源有限，容易扩展到大规模网络拓扑级别，可为 P4 程序研究开发提供大规模网络拓扑级别的模拟测试。

表 1 ns3 与 NS4 的对比

特点	ns3	NS4
行为模型开发语言	C++	P4
耦合性	√	×
可移植性	×	√

然而在实现 NS4 的过程中，面临着如下的挑战：

C1：如何基于 ns3 模拟平台构建可编程交换机转发平面的数据包处理行为模型。可编程交换机转发平面支持多种复杂的数据包处理行为，例如重提交、再循环、克隆、广播等，里面牵涉到复杂的缓冲器、队列调度系统，如何构建出支持这些复杂机制的可编程交换机转发平面的数据包处理行为模型是一个重大挑战。

C2：如何将转发平面运行时的流表操作转换为 ns3 网络模拟系统中的离散事件。ns3 是一个基于离散事件的网络模拟器，即里面的操作是提前预计好的、由事件驱动的。然而 P4 程序的流表操作是由控制平面应用程序管理的，不是离散型的。而目前，现存的 P4 运行时控制器如 P4Runtime[32]和 ONOS-BMv2[31,62]都不能够直接与 ns3 网络模拟系统进行交互。

C3：如何基于当前网络拓扑结构设计自动流表规则。由于网络中的每个 P4 设备都需要安装流表项以执行相应的网络策略，然而当网络规模达到一定程度时，手工配置并下发每一个 P4 设备的流表项将是一件十分费力并且容易出错的工作，因此需要提供自动下发流表项机制以减轻繁重的人力负担。但是不同的网络模拟任务可能处在不同的网络拓扑环境之下，如何基于不同网络拓扑结构构建相应的自动流表规则是一个重大挑战。

NS4 内部构建了一个 P4 流水线，里面包括了缓冲器、队列的完整设计，以建立真实 P4 设备的模型。为了适应 ns3 模拟系统离散事件处理机制，NS4 提供了一个控制模块用于运行时离散操作。此外，NS4 借用了 OpenFlow[14]实时流表下发的想法，提供了一个模块用于实时计算和下发流表项，以减轻繁琐的流表规则配置工作。

整体而言，本文做了如下工作：

- （1）设计并实现了 NS4，第一个支持可编程数据平面技术的网络模拟器，源

代码可从 Github[15]访问。

- (2) 设计了 P4 流水线内部缓冲器、队列系统结构来构建真实 P4 设备模型以正确地处理数据包行为，设计了几个控制模块来进行流表规则实时计算、流表下发、流表查询操作。
- (3) 构建了 NS3 与 NS4 延迟对比实验、大规模 Fattree 网络拓扑测试实验以评估 NS4 有效性，使用了 P4 和 C++开发几个有代表性网络应用程序以衡量 NS4 的开发复杂度，展现了 L4 层负载均衡器 SilkRoad 以评估 NS4 可用性。

本文接下来的内容按照如下结构展开。TO DO

1.1 研究背景

随着互联网规模的不断增长，网络架构变得越来越复杂，新的网络协议以及网络功能越来越难以直接部署在实际网络中进行测试和验证。因此，学术界和工业界设计了很多网络模拟系统用于对网络协议和网络功能的有效性和性能进行评估。

现有的网络模拟系统有 OPNet、REAL、PFPSim、ns 等。OPNet[1]是面向对象的通用目的网络模拟器，它使用动态进程分配技术构建虚拟电路传输模型，以便进行离散事件的模拟，它基于 Proto-C 语言，可实现几乎所有网络功能及协议，它除了规范模拟开发环境外，还为网络模拟提供了图形化的 GUI 界面。REAL[2]是一个用于研究流动态行为以及拥塞控制的网络模拟器，它使用 NetLanguage 描述网络拓扑、协议、数据和控制参数，目前已提供 30 多个模块来进行流控制协议的模拟。PFPSim[3]是一个基于可编程转发平面结构的、用于数据包处理应用程序分析和验证的网络模拟器，使用转发结构描述语言（FAD）定义转发设备体系结构，使用 C++或 P4 定义应用程序代码，它关注的是转发设备体系结构的建模。Crys-talNet[102] 是一个具有极高可扩展性的网络模拟器，它能够模拟数千个网络设备。ns 模拟工具集，由 ns1、ns2[29]、ns3[103]组成，是由不同团体和组织开发的一套基于离散事件的开源网络模拟器。其中 ns3 由 C++、Python 编写，广泛用于网络研究和教学领域，里面包含了大量由开源社区人员开发的扩展插件，可支持很多网络场景[104-106]。

P4 是一种用于描述可编程交换机如何处理数据包行为的领域特定语言。

1.2 研究问题

1.3 本文核心想法

1.4 实现挑战

1.5 本文工作内容

2 网络模拟器 ns-3

2.1 ns-3 概况

ns-3 首次发布于 2008 年，是一个开源的基于离散事件的网络模拟器，用于网络研究和教育。ns-3 使用 C++ 和 Python 编写，关注于构建网络协议、网络应用程序的工作环境，因此提供了许多构造网络工作环境的模块以及用于进行模拟实验的模拟引擎。区别于其他的网络模拟工具，ns-3 提供了一系列函数库用于与外部软件库联合使用。尽管 ns-3 也支持数据分析以及可视化工具，但更推荐用户工作于命令行环境。ns-3 主要是用于 Linux 系统，也提供了对 FreeBSD、Cygwin 的支持。

2.2 ns-3 特征

在 ns-3 中，Node 是基本计算设备的抽象，可以使用 Node 添加应用程序、协议栈、外部网卡及其对应的驱动器来模仿真实网络结构。Application 是产生将被模拟的活动的应用程序的抽象，Application 提供了管理用户级别的应用程序的接口，开发者可以使用面向对象编程的方法继承 Application，实例化它们特定需求的应用程序。基本通讯子网的抽象使用 Channel 表示，它提供了管理通讯子网对象以及与节点 Node 连接的方法。网络设备抽象使用 NetDevice 表示，它提供了管理节点 Node 与通道 Channel 连接的方法。

使用 ns-3 进行模拟需要进行搭建网络拓扑，创建网络设备，赋予 Mac 地址，将网络设备安装到节点上，配置节点的协议栈，连接网络设备和通道，给节点安装应用程序，激发模拟等操作。

2.3 ns-3 典型应用

目前使用 ns-3 进行模拟的应用有很多。

3 领域特定语言 P4

3.1 P4 概况

P4 是一门用于描述网络转发设备（例如交换机、路由器、网卡、或者其他网络应用程序）如何表达数据包处理行为的语言。它基于一个由解析器、匹配行为表、逆解析器等元素组成的抽象转发模型。解析器用于提取进入的数据包的头部信息，匹配行为表会对匹配上特定流表项的数据包执行对应的行为操作，逆解析器将数据包头部与数据包内容重新组合成数据包。

使用 P4 程序，编程人员无需关注潜在底层硬件设备差异性（目标独立性），不用限制于任何特定的网络协议（协议无关性），只需按照业务需求、行为逻辑编写数据包解析、处理程序，此外，编程人员还可在将程序部署到硬件设备后修改数据包处理行为（可重构性），可满足网络更新的需求。

3.2 P4 抽象转发模型

P4 的抽象转发模型泛化了数据包是怎样被不同的技术（例如，固定功能交换机 ASICs, NPUs, 可重配置交换机，软件交换机，FPGAs）在不同的转发设备（例如，以太网交换机，负载平衡器，路由器）下被处理的过程。基于抽象转发模型，开发人员可编写出目标独立的程序，再借助编译器可匹配到各种不同的转发设备。

抽象转发模型由配置、下发两种不同类型的操作控制。配置操作定义解析器，设置每个阶段中匹配动作表顺序，明确每个阶段中匹配动作表应该匹配的头部字段以及执行的动作集。配置操作决定了应支持哪种协议以及如何处理数据包。下发操作通过对特定的匹配动作表添加或删除流表项来决定对哪个数据包执行怎样的操作，以满足上层网络策略的需求。

如图 3-2 所示，抽象转发模型由解析器、入口流水线、缓存器、出口流水线、逆解析器等组成。到达的数据包首先经解析器提取头部字段，被提取的头部字段然后被传递到入口和出口流水线中的匹配动作表，被特定流表项匹配上的数据包将执行与之对应的动作。

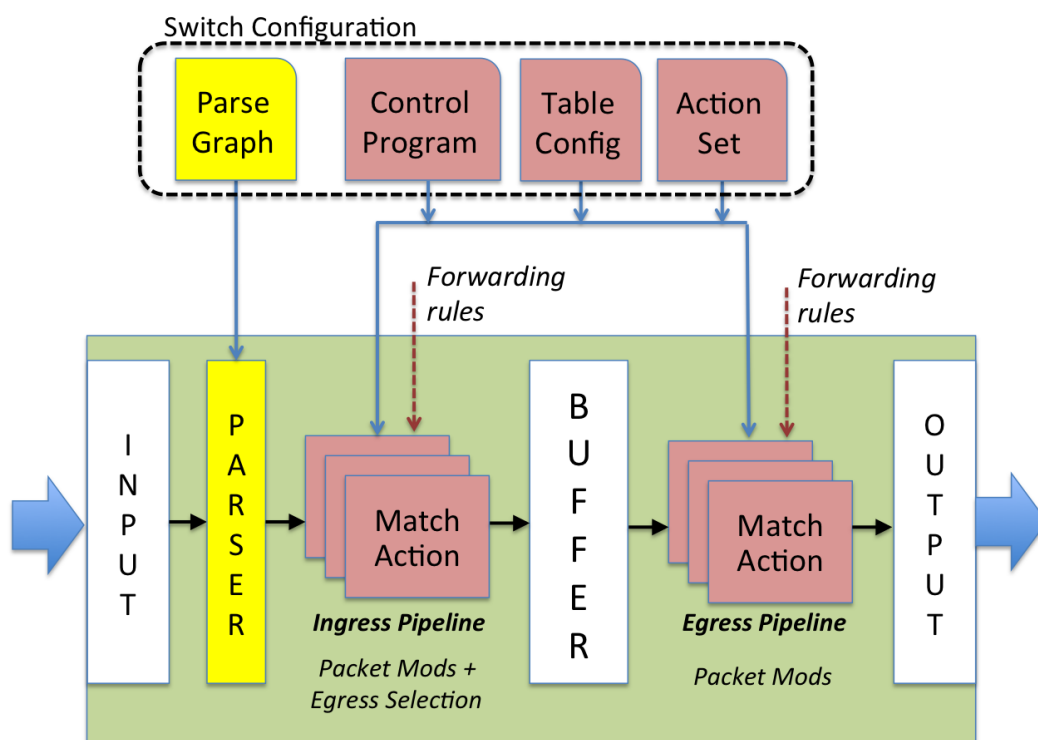


图 3-2 抽象转发模型

3.3 P4 语言要素

P4 程序包含了以下几个关键的语言要素。

3.3.1 头部

头部定义了一系列字段的顺序和结构，包括字段的宽度以及字段取值范围的限定。

3.3.2 解析器

解析器明确了怎样鉴别数据包头部以及头部中的有效顺序。P4 使用状态机来实现解析器，解析开始于起始状态，逐次按照解析定义遍历数据包头部，提取相应的头部字段，改变解析器状态，直到到达停止状态才结束解析行为，提取的数据包头部字段值将被发送到匹配动作表以供处理。

3.3.3 表

匹配动作表定义了表将要匹配的字段以及可能执行的动作，它允许编译器决定内存类型以及需要使用多少内存来实现表，它是进行数据包处理的核心机制。

3.3.4 动作

动作是描述数据包头部和元数据如何被处理的代码段，P4 支持从简单的协议无关

的原始动作集中构造复杂的动作，以实现复杂的数据包处理逻辑，P4 假定在一个复杂动作功能中的原始动作是可以并行执行的。

3.3.5 控制程序

控制程序决定了匹配动作表应用到数据包的顺序。控制程序通过函数、条件表达式、表的引用来实现控制流定义。

3.4 P4 底层架构

RMT 架构 TO DO

3.5 P4 设备（硬件、软件）

TO DO

3.6 P4 应用

TO DO

4 NS4 的设计

4.1 NS4 的结构

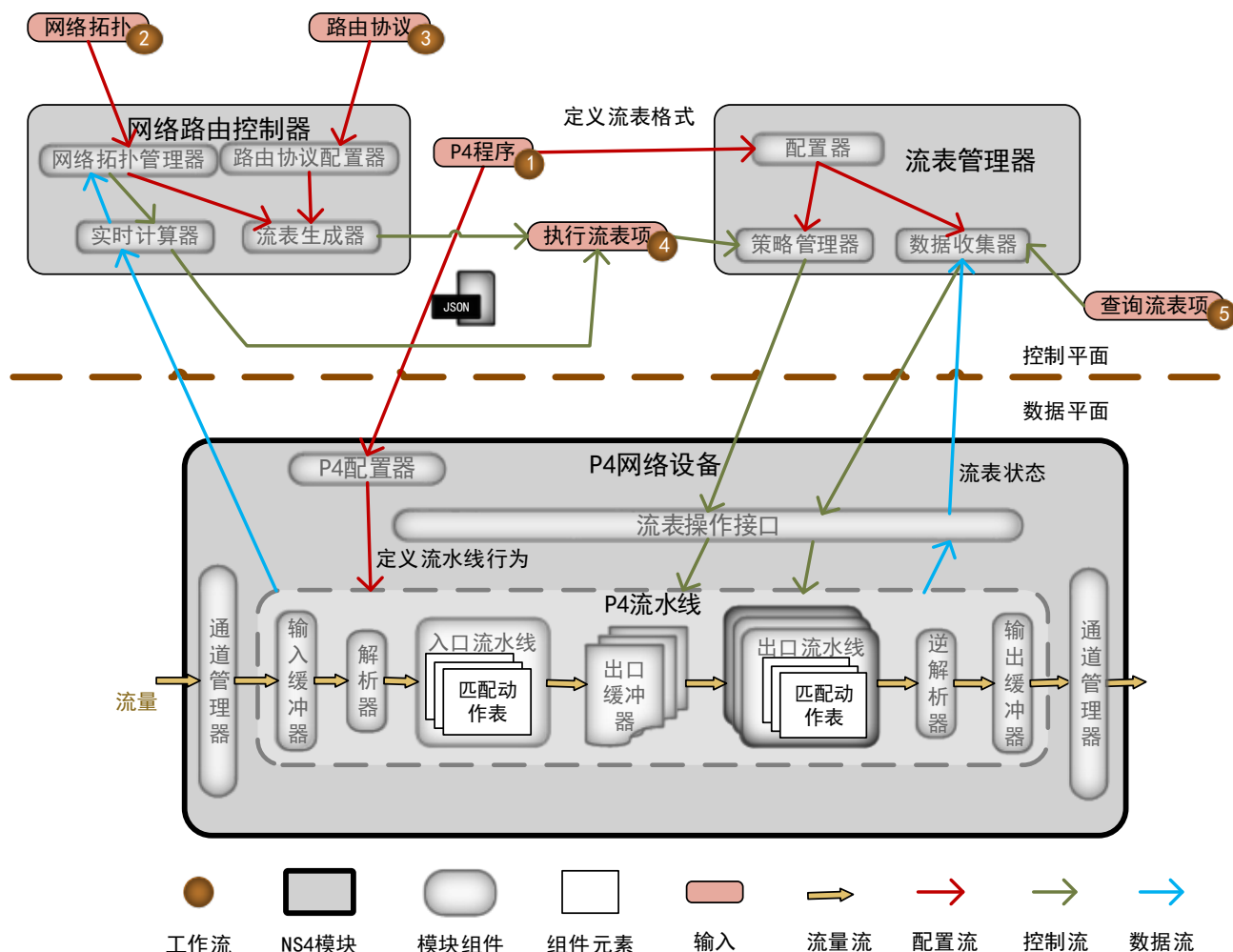


图 4-1 NS4 系统架构图

4.2 NS4 的数据平面

4.2.1 P4 流水线

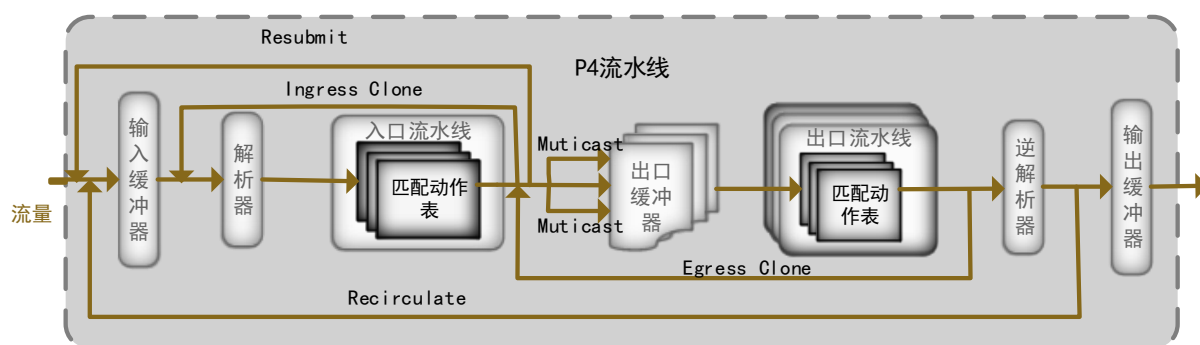


图 4-2-1 P4 流水线

4.2.2 队列系统

主要是讲出口缓冲器和出口流水线之间的关系。需要再细看 simple switch 的代码。

4.3 NS4 的控制平面

4.3.1 流表管理（流表格式 事件机制需不需要？）

4.3.2 网络路由（OpenFlow 模式 提前下发模式（ECMP、Nix Vector））

5 NS4 的实现

5.1 内部模块（包含了哪几个模块，每个模块有什么功能）

5.1.1 P4 网络设备模块

5.1.2 P4 交换机接口模块

5.1.3 流表操作代理模块

5.1.4 网络路由模块

包括两个部分 OpenFlow、协议下发

5.1.5 网络拓扑读取模块

5.1.6 异常处理模块

5.2 NS4 支持特征

5.3 NS4 的扩展性

5.4 NS4 的局限性

6 NS4 的评估

总体说明+实验环境说明

6.1 案例学习

6.2 开发复杂度

6.3 模拟表现性

6.3.1 延迟

6.3.2 资源利用率

6.3.3 运行时间

7 NS4 的使用（TO DO：找一个小型的网络应用场景）

7.1 场景说明

7.2 P4 程序的定义

7.3 网络拓扑定义

7.4 模拟程序定义

7.5 流表规则定义

7.6 模拟

8 规划与展望

8.1 NS4

8.1.1 标题 3

9 总结

9.1 标题 2

9.1.1 标题 3

10 XXXXXXXXXXXX（标题 1）

10.1 标题 2

10.1.1 标题 3

公式按章重新编号：

$$\frac{n!}{r!(n-r)!} \frac{1}{2} \quad (10-1)$$

公式（10-1）说明，……………（公式在正文中的引用）

图题注：

图 10-1 XXXXXXX

11 XXXXXXXXXXXX（标题 1）

11.1 标题 2

11.1.1 标题 3

公式按章重新编号：

$$\frac{n!}{r!(n-r)!} \frac{1}{2} \quad (11-1)$$

公式（11-1）说明，……………（公式在正文中的引用）

图题注：

图 11-1 XXXXXX

12 结论与展望

结论与展望：结论包括对整个研究工作进行归纳和综合而得出的总结；所得结果与已有结果的比较；联系实际结果，指出它的学术意义或应用价值和在实际中推广应用的可能性；在本课题研究中尚存在的问题，对进一步开展研究的见解与建议。结论集中反映作者的研究成果，表达作者对所研究课题的见解和主张，是全文的思想精髓，是全文的思想体现，一般应写得概括、篇幅较短。撰写时应注意下列事项：

- 结论要简单、明确。在措辞上应严密，但又容易被人领会。
- 结论应反映个人的研究工作，属于前人和他人已有过的结论可少提。
- 要实事求是地介绍自己研究的结果，切忌言过其实，在无充分把握时，应留有余地。

12.1 标题 2

12.1.1 标题 3

公式按章重新编号：

$$\frac{n!}{r!(n-r)!} \frac{1}{2} \quad (12-1)$$

公式（12-1）说明，……………（公式在正文中的引用）

图题注：

图 12-1 XXXXXX

致 谢

致谢：对于毕业设计（论文）的指导教师，对毕业设计（论文）提过有益的建议或给予过帮助的同学、同事与集体，都应在论文的结尾部分书面致谢，言辞应恳切、实事求是。**应注明受何种基金支持（没有可不写）。**

参考文献

（此上两空行不能删除，是为 EndNote 的参考文献列表所预留）

文后著录的参考文献务必实事求是。论文中引用过的文献必须著录，未引用的文献不得出现。应遵循学术道德规范，避免涉嫌抄袭、剽窃等学术不端行为。

参考文献一般应是作者亲自考察过的对学位论文有参考价值的文献，除特殊情况外，一般不应间接引用。

参考文献应有权威性，要注意引用最新的文献。

参考文献的数量：

毕业论文一般不得少于 10 篇，其中外文文献不得少于 2 篇。

参考文献的著录格式应符合国家标准 GB/T 7714-2005 《文后参考文献著录规则》。参考文献中每条项目应齐全。

文献中的作者不超过三位时全部列出，超过三位时，一般只列前三位，中文的后面加“等”字，英文的后面加“et al”，作者姓名之间用逗号分开。

外国人名一般采用姓在前，名在后的著录法，姓全写且第一个字母大写，名简写成单个大写字母且不加标点，姓和名之间空 1 格，如：“Metcalf SW”。也可采用名在前，姓在后的著录法，姓全写且第一个字母大写，名简写成单个大写字母且不加标点，名和姓之间空 1 格，如：“SW Metcalf”。

中文人名的英文表达方式：

简写时，采用姓在前，名在后的著录法，姓全写且第一个字母大写，名简写成单个大写字母且不加标点，如，“钱学森”，简写为“Qian XS”。

全拼时，名在前，姓在后的著录法，名的第一个字母大写，名连写，名后空 1 格写姓，姓的第一个字母大写。如，“钱学森”，写为“Xuesen Qian”。

文后参考文献著录格式范例样板，采用五号。

具体要求如下：

A 专著（包括普通图书 [M]、论文集和会议录 [C]、科技报告 [R]、学位论文 [D]、标准 [S]）

主要责任者. 文献题名 [文献类型标志]. 其他责任者. 版本项(第 1 版不标注). 出版地：出版者，出版年：引文页码. 获取和访问路径.

B 专著中的析出文献

析出文献主要责任者. 析出文献题名 [文献类型标志]. 析出文献其他责任者 // 专著主要责任者. 专著题名：其他题名信息. 版本项(第 1 版不标注). 出版地：出版者，

出版年：析出文献的起止页码．获取和访问路径．

C 连续出版物

主要责任者．题名:其他题名信息 [文献类型标志]．年，卷（期）一年，卷（期）．
出版地：出版者，出版年．获取和访问路径．

D 连续出版物中的析出文献（包括期刊中析出的文献[J]、报纸中析出的文献[N].）

析出文献主要责任者．析出文献题名 [文献类型标志]．连续出版物题名：其他题名信息，年，卷（期）：页码．获取和访问路径．

E 专利文献

专利发明者/专利申请者或所有者．专利题名：专利国别,专利号 [文献类型标志]．
公告日期或公开日期．获取和访问路径．

F 电子文献（包括专著或连续出版物中析出的电子文献）

主要责任者．题名：其他题名信息[文献类型标志/载体类型标志]．出版地：出版者，出版年（更新或修改日期）．获取和访问路径．

表 2-2 文献类型和标志代码

文献类型	标志代码	文献类型	标志代码
普通图书	M	会议录	C
汇编	G	报纸	N
期刊	J	学位论文	D
报告	R	标准	S
专利	P	数据库	DB
计算机程序	CP	电子公告	EB

表 2-3 电子文献载体和标志代码

载体类型	标志代码	载体类型	标志代码
磁带（magnetic tape）	MT	磁盘（disk）	DK
光盘（CD-ROM）	CD	联机网络（online）	OL

样例：

- [1] 刘国钧,郑如斯. 中国书的故事 [M]. 北京: 中国青年出版社, 1979: 110-115.
- [2] 昂温 G. 外国出版史[M]. 陈生铮译. 北京: 中国书籍出版社, 1988.
- [3] 辛希孟. 信息技术与信息服务国际研讨会论文集: A 集 [C]. 北京: 中国社会科学出版社, 1979.
- [4] 冯西桥. 核反应堆压力容器的 LBB 分析 [R]. 北京: 核能技术设计研究院, 1997.
- [5] 张和生. 地质力学系统理论 [D]. 太原: 太原理工大学, 1998.
- [6] 全国文献工作标准化技术委员会第七分委员会. GB/T 5795-1986. 中国标准书号 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.

- [7] 罗云. 安全科学理论体系的发展及趋势探讨[M]//白春华, 何学秋, 吴宗之. 21世纪安全科学与技术的发展趋势. 北京: 科学出版社, 2000: 1-5.
- [8] 钟文发. 非线性规划在可燃毒物配置中的应用[C]//赵玮. 运筹学的理论与应用: 中国运筹学会第五届大会论文集. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1996: 468—471.
- [9] 高义民, 张凤华, 邢建东等. 颗粒增强不锈钢基复合材料冲蚀磨损性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(7): 727-730.
- [10] Papworth A, Fox P, Zeng GT, et al. Ability of aluminum alloy to wet alumina fibres by addition of bismuth[J]. Mater Sci & Technol, 1999, 15(4): 419-428.
- [11] 丁文祥. 数字革命与竞争国际化[N]. 中国青年报, 2000—11—20(15).
- [12] 姜锡洲. 3—一种温热外敷药制备方案: 中国, 881056078 [P]. 1989-07-26.
- [13] Koseki A, Momose H, Kawahito M, et al. Complier: US, 828402 [P/OL]. 2002-05-25 [2002-05-28]. <http://FF&p>.
- [14] Online Computer Library Center, Inc. History of OCLC[EB/OL]. [2000-01-08]. [http://www. clc.org/about/history/default.htm](http://www.clc.org/about/history/default.htm).
- [15] 江向东. 互联网环境下的信息处理与图书管理系统解决方案[J/OL]. 情报学报, 1999, 18(2): 4 [2000-01-18]. <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical/qbxb>.
- [16] Scitor C. Project scheduler[CP/DK]. Sunnyvale, Calif.: Scitor Corp, 1983.
- [17] Metcalf SW. The Tort Hall air emission study[C/OL]//The International Congress on Hazardous Waste, Marquis Hotel, Atlanta, Georgia, June 5-8, 1995: impact on human and ecological health [1998-09-22]. <http://atsdrl.atsdr.cdc.gov:8080/cong95.html>.

参考文献里面标点符号：英文文献用半角,中文文献用全角。

附 录

附录编号依次编为附录 A，附录 B。附录标题各占一行，按一级标题编排。每一个附录一般应另起一页编排，如果有多个较短的附录，也可接排。附录中的图表公式另行编排序号，与正文分开，编号前加“附录 A-”字样。