

# 虚拟网络映射节能算法研究

刘认伦, 杨龙祥

(南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003)

**摘要:**虚拟网络映射是一种解决未来互联网发展问题的关键技术,该技术能够使多个异构的虚拟网络共存于同一个物理网络,共享底层资源。但目前的虚拟网络映射算法大多是针对网络负载较高的情况,且多属启发式的映射算法,在网络负载较低时,虚拟网络映射可能引起底层资源不能被充分利用,导致网络能耗的浪费。随着大规模网络的发展,底层网络设备的能耗问题越来越受到关注。虚拟网络映射节能算法,通过对底层网络资源的整合,可保证在不影响正常通信的情况下,有效地解决虚拟网络映射过程中的能耗浪费问题。基于此,主要对虚拟网络映射的节能算法进行调查,对虚拟网络中的节能问题进行了重点描述,归纳了典型的能耗模型,分析了典型算法的映射过程以及指标,并讨论了未来的研究方向。

**关键词:**虚拟网络映射;节能;资源整合;能耗模型

**中图分类号:**TP301.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2017)03-0029-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.03.006

## Investigation on Energy-aware Virtual Network Embedding

LIU Ren-lun, YANG Long-xiang

(College of Communication and Information Engineering, Nanjing University of  
Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Virtual Network Embedding (VNE) is a crucial technique to overcome development barriers of future Internet, which could permit multiple heterogeneous virtual networks to coexist in a common physical one for sharing substrate resources. However, current mapping algorithms of virtual network are mainly suitable for the situation that network traffic load is often high and mostly belong to heuristic mapping algorithm, which could lead to waste of network energy consumption and insufficient utilization of substrate resources as network energy consumption is low. With development of large scale network, problem for energy consumption of substrate network has attracted more and more attention. Energy-aware VNE Algorithm could effectively solve this problem by resource consolidation of substrate network under the condition that normal communication is ensured. Several energy saving algorithms have been investigated besides energy saving problem in virtual network has been emphasized and depicted. Classical models of energy consumption have also been sorted and discussed. Analysis on mapping processes of classical algorithms and their parameter indices have been conducted and the future investigation direction has been proposed.

**Key words:** virtual network embedding; energy-aware; resource consolidation; model of energy consumption

## 0 引言

作为未来网络的一项重要技术,网络虚拟化技术能够克服现在因特网中的一些困难。网络虚拟化最显著的优点是能够使多个异构的虚拟网络共享同一实体,即多个异构的虚拟网络可以共存于一个底层网络中。将多个虚拟网络映射到同一个底层网络的问题通常被称为虚拟网络映射(VNE)。

虚拟网络映射主要解决节点与链路的资源分配问

题,因此,虚拟网络映射又分为两个子问题:虚拟节点映射(VoNM)和虚拟链路映射(VLiM)。虚拟节点映射会影响虚拟链路映射,所以,在将虚拟网络请求映射到底层网络时,首先要解决虚拟节点映射,然后再解决虚拟链路映射。

传统的虚拟网络映射将重点放在网络的收益成本上,即尽可能多地将虚拟网络映射到底层网络上。然而,现有的网络都是为峰值负载而设计,即使面临高的

收稿日期:2016-04-22

修回日期:2016-08-16

网络出版时间:2017-02-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61372124);国家“973”重点基础研究发展计划项目(2013CB329104)

作者简介:刘认伦(1991-),男,硕士,研究方向为移动通信与无线技术;杨龙祥,教授,博士生导师,研究方向为移动无线通信系统和物联网。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170217.1628.038.html>

网络请求时仍然过度分配资源,以确保正常运行。因此,这种最大限度地利用资源的方式会引起过高的资源利用不足和不必要的能量消耗。随着近年来人们环保意识的提高,生产过程中能耗以及碳排放越来越受到研究者的关注。根据文献[1],在大型 ISP 的骨干网中,链路利用率仅有 30%~40%。因此,绿色网络这一课题引起了研究者们的兴趣。

虚拟网络映射的绿色网络课题即节能问题,旨在不影响网络性能的前提下,尽可能少地使用底层网络资源或是尽可能使用能耗低的底层网络资源映射虚拟网络。

文中主要针对虚拟网络映射的节能算法和方案进行研究,重点介绍了虚拟网络映射节能算法的基本问题定义,节能的数学模型,典型算法的映射过程和优化策略,以及映射的性能指标。分析了目前节能方案中尚未解决的问题,对未来的工作进行了展望。

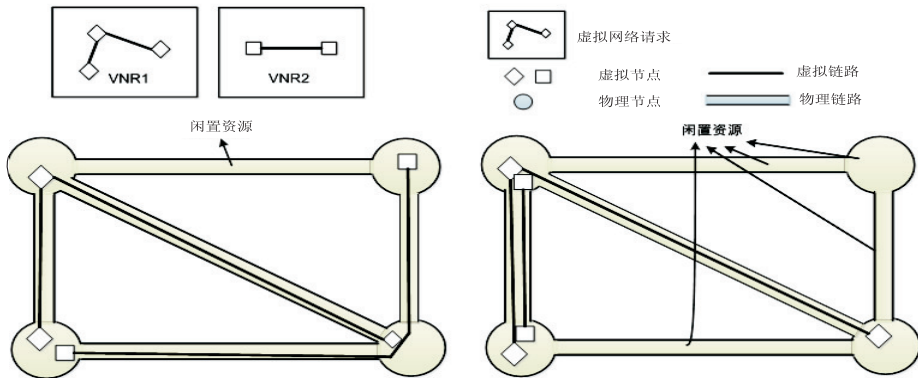


图 1 非能量感知的 VNE(左)与能量感知的 VNE(右)

## 1.2 能耗模型

根据不同的节能目的,需要为底层网络建立不同的数学模型。VNE 节能算法的最终目的是使底层网络能耗尽可能小,因此,以网络中节点和链路能耗直接建模是最合理的方法,实际中可能会遇到 CO<sub>2</sub>排放、电力成本等问题。于是,提出一些考虑这些问题的 VNE 节能算法,把这些算法归纳到一类中进行陈述。

### (1) 节点与链路的简单模型。

文献[2]中使用只考虑节点与链路数量的模型,是最早提出的一种 VNE 节能能耗模型。这种算法将底层网络中的节点和链路资源视为一个点和一条线,并假设各个节点、各条链路的能耗相等,这样,底层网络的能耗模型简化,网络总能耗只需算出节点和链路的数量或是其数量的加权值。但由于这种模型过于简单,尤其是节点能耗模型与实际的能耗方式不同,因而其作用有限,在绿色节能课题研究初期,此模型使用较多,例如文献[3-4]。

### (2) 节点与链路的能耗模型。

这种模型考虑实际中节点和链路的能耗特点,是

## 1 虚拟网络映射节能算法

### 1.1 问题描述

虚拟网络映射节能算法可以根据底层网络是否以实际资源为模型称为能量感知型 VNE (Energy-aware VNE) 或能量效率型 VNE (Energy-efficient VNE)。以能量感知型 VNE 为例,描述虚拟网络映射中的节能问题。非能量感知的虚拟网络映射算法不考虑网络中闲置的节点和链路的能耗,所以造成网络能耗的浪费。为了解决这个问题并优化网络资源配置,能量感知的虚拟网络映射节能算法把目标定为使用网络中最少的资源为现有虚拟网络请求分配资源,关闭网络中未被映射的节点与链路。如图 1 所示,非能量感知 VNE 并未充分利用节点与链路中的资源,并且闲置的节点和链路仍有能耗;而能量感知的 VNE 通过资源整合重新分配资源,使节点和链路都能得到充分利用,并关闭未被映射的节点和链路,使整个网络的能耗最小。

目前课题研究中使用较为广泛的一种模型。一种典型的方法是将节点和链路能耗分为基础能耗和维持虚拟网络的能耗<sup>[5]</sup>。这种模型考虑底层节点 CPU 使用率同节点能耗呈线性的特点以及底层链路的带宽使用率和链路长度同链路能耗呈线性的特点,将这类能耗定义为维持虚拟网络的能耗。并且节点可以根据需要进行分类,文献[6]中将节点分为两类:有虚拟节点映射到的底层节点(host node,维持节点)和只有虚拟链路经过的底层节点(forwarding node,转发节点)。这种模型虽然较为简单,但很实用,以此模型进行的研究也较多。文献[7]中给出了应用此类模型的四个定理,阐述了节点能耗、链路能耗和全局网络能耗的关系以及计算方法。另一典型模型是考虑实际网络中的器件能耗,这种模型常用于云网络、数据中心等现实场景<sup>[8-10]</sup>。

### (3) 其他模型。

文献[6]提出了一种以一天的电力价格为目标函数的模型,需要考虑不同时段、不同区域的电价的变化。另外一种较为少见的模型在文献[11]中提出,这种模型以底层网络中节点和链路的 CO<sub>2</sub>排放量为目标

函数,当虚拟网络请求到达时,优先为其分配 CO<sub>2</sub> 排放少的节点和链路资源。

1.3 节能方法的映射过程

底层网络中,能耗的主要来源只有两个:节点和链路。因此,底层网络节能的方向主要在节点和链路上。节能的方法主要有两种:节点节能和链路节能。为了区别底层网络中被映射的资源 and 未被映射的资源,所有的能耗模型都会为节点和链路设定两种状态:唤醒和休眠。当节点或者链路被映射,则此节点或链路处于唤醒状态;反之,处于休眠状态。并且,一个节点休眠时,与这个节点直接相连的所有链路也被迫休眠。因此,节点休眠的条件高于链路。

(1) 节点节能方法的映射过程。

节点节能方法主要依靠节点休眠实现。在上文中提到节点休眠会导致链路被迫休眠,根据文献[12],底层网络中能耗较高的是节点,相对链路休眠,关闭节点能够节省更多的能量。而且,节点映射过程必然影响链路映射过程。文献[3]中给出了一种在选取休眠节点后,如何寻找合理的链路的可行方案:由于链路能耗与路径长度有关,所以在选定节点后,链路的选取应遵循两个原则:一是路径最短;二是链路已用。找不到已用链路时遵循路径最短原则。考虑到节点映射先于链路,因此节能算法中少有只考虑优化节点映射的节能方案。因此,将这类算法归纳到节点节能方法中。

作为第一个讨论虚拟网络映射节能的算法,文献[2,13-16]分别给出了一种典型的节能方法。研究者假设所有的节点能耗相同、容量相等,所有的链路能耗相同、带宽相等,即使用简单的能耗模型。在映射第一个虚拟网络请求的第一个节点时,随机选取节点映射,依据最小路径选取其他节点,并且要保证对同一个虚拟网络请求中的节点不能同时映射到同一个底层节点上。连在映射后继到达的虚拟网络请求时,则尽量使用已经使用过的节点。由于这个算法中对链路带宽的约束要求不高,所以约束主要来自于节点,所以这是一种典型的节点节能算法。

Sen Su 等在文献[5-6]中细化了节点和链路的能耗,给出了一种节点和链路分别依据 CPU 和带宽使用率计算能耗的模型。并且在文献[5]中,研究者提出节点在映射过程中必须考虑虚拟节点和底层节点的距离因素,如果单纯地将虚拟节点映射到底层节点上,可能会出现一个虚拟网络请求的所有虚拟节点映射到同一个底层节点上的状况,这样一来,映射看似变得简单了,而且不需要链路映射过程,数据的传输和交换完全可以在同一个底层节点中完成。但是,考虑到节点的距离,这种方案在实际中是不可行的。另外,研究者将节点进行平方数划分,认为底层网络中的节点可以分为主

节点(host node)和路由节点(router node),见图2。其中,主节点在网络中只负责虚拟节点的映射,而路由节点不负责映射虚拟节点,只负责转发数据(这样的节点也称为跳(hop))。在映射时,算法也遵循最短路径和优先已用资源的原则。但在将虚拟节点映射到主节点上时,应考虑与主节点间的距离。

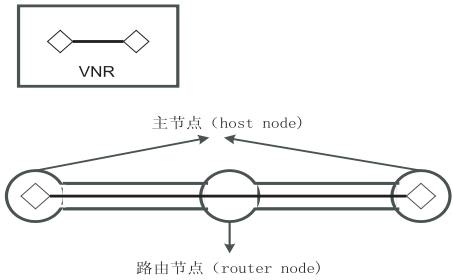


图2 主节点与路由节点

即便是在过度分配资源的网络负载条件下,也有可能有个别的节点或链路未被使用到,将这样的节点或链路休眠并不能满足节能的需要。休眠节点是必要的,但达到节能的目的,必须优化资源分配,尽可能少地使用节点和链路。对于底层节点而言,最主要的资源是 CPU,要使虚拟节点充分利用 CPU,则需要尽可能多地将虚拟节点映射到一个底层节点上。考虑到这点,文献[6]给出了一种底层节点的排序方法,以获得最大 CPU 利用率。研究者假设每个底层节点的 CPU 资源相等,在首次映射请求时,随机选取底层节点分配资源。然后,根据各个节点剩余的资源从小到大进行排序。为下一个请求分配资源时,从排序集合中按顺序选取满足映射条件的节点,被使用过的节点将优先选取。当请求的映射完成后,需要根据节点剩余资源重新排序。若有节点的资源被用尽,则将这个节点从排序集合中移除。这样,底层节点的资源不仅得到了充分利用,而且减少了网络中应用到的底层节点数,从而节省了能量。

映射后的底层节点排序如图3所示。

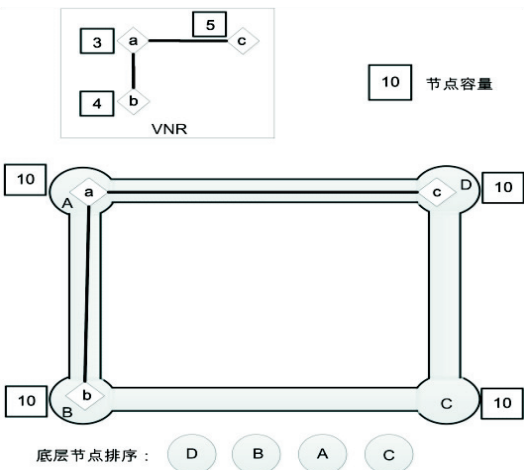


图3 映射后的底层节点排序

## (2) 链路节能方法的映射过程。

根据文献[1], 链路节能的方法可以有链路休眠以及自适应流量传输两种。目前, 自适应流量传输尚未有研究者提出。链路的休眠条件相对节点要低, 节点的休眠必须满足与其直接相连的所有链路休眠, 而链路休眠只要考虑是否有虚拟链路映射到自身。考虑到节点在休眠时节点中的数据无法使用, 而造成通信中断的状况, 文献[17-19]提出以链路休眠实现节能的方案。

### ①可分割链路的链路休眠。

链路分割是指将一条虚拟链路按照其请求带宽分成多条虚拟子链路, 子链路带宽总和与请求带宽相等。文献[17]提出了一种基于可分割链路的链路休眠算法, 在网络从高负载时段进入低负载时段, 一些链路的带宽并不能得到充分利用, 将网络中带宽占用率低的底层链路上的虚拟链路重新映射到带宽占用率高的链路上, 并使带宽占用率低的链路休眠。带宽占用率高的链路并不一定能够满足需要映射的虚拟链路带宽需求, 于是, 将这条虚拟链路分割成多条去映射, 不仅使底层链路带宽得到充分利用, 且提高了映射成功率。

虚拟链路的分割映射如图 4 所示。

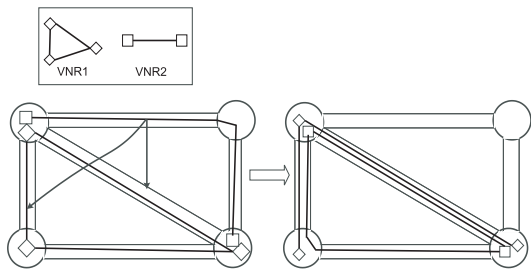


图 4 虚拟链路的分割映射

然而, 分割链路可能带来通信延迟和数据包顺序错乱。分割为多条虚拟子链路需要为其寻找多条可用路径, 这些路径的长度不同, 因此数据在路径上传输的时间也不同, 从一个节点传送数据到另一个节点, 数据的到达时间以耗时最长的一条数据传输路径为准。另外, 短路径可能在时间  $t$  内传送了多个数据包, 而同时长路径上的数据可能还未到达接收节点, 造成数据包接受顺序错乱。

### ②不可分割链路的链路休眠。

文献[17-19]中均提出了不可分割链路的链路休眠方法。虚拟链路不可分割的好处是数据有序传输, 通信延迟较短。但相比可分割链路, 带宽占用率低的底层链路在为其虚拟链路重新选择映射路径时, 变得相对困难。由于链路能耗不仅与其带宽使用率有关, 还与链路自身长度有关, 越长的链路能耗越大<sup>[5]</sup>, 所以将链路映射到路径距离短的链路上也是一种较好的节能策略。万方数据

## 1.4 优化策略

由于 VNE 问题是 NP 困难的, 考虑到 VNE 在大规模网络中的应用, 相应的优化方法的寻找也变得费时费力。于是, 提出了三种适用于不同情景的算法:

### (1) 精简式算法 (Exact solution)。

精简式算法适合小规模网络场景, 尤其在节点与链路的简单模型中 (1.2 节), 有着较好的应用。这种优化算法的实现可以通过整数线性规划 (Integer Linear Programming), 文献[2-4]中各自提出了一种混合整数规划 (Mixed Integer Programming), 旨在小规模的底层网络中找到最少的节点和链路满足虚拟网络请求。由于整数线性规划的 NP 困难性, 精简式算法可能引起指数式增长的执行时间, 然而, 精简式算法可以为启发式的虚拟网络映射算法提供最优界 (optimal bound)。

### (2) 启发式算法 (Heuristics solution)。

启发式算法的提出, 解决了在映射过程中算法执行时间过长的问题。尤其在动态的网络中, 如果一个虚拟网络请求的映射时间过长, 将会影响下一个到达的虚拟网络请求的映射, 启发式算法较短的执行时间能够比较好地克服这个问题。目前, 采用启发式算法的方案被广泛应用于研究中, 文献[6, 13, 16, 20-22]均使用了启发式算法进行优化。

在文献[19]中, 研究者分别提出了精简式的二进制整数线性规划算法 (Binary Integer Linear Programming, BILP) 和启发式算法。根据其仿真结果, 在相同的底层网络上运行时, 精简式 BILP 算法的节能效果相对提出的启发式算法要好, 启发式算法的运行结果只能在网络负载较低的时段逼近 BILP, BILP 为启发式算法提供了节能上界。但是, BILP 的运行时间约为 4 000 s, 远大于启发式算法 (3 s), 从运行时间上考虑, 启发式算法远好于精简式。

然而, 启发式算法得到优化结果仅仅是局部最优, 不是全局最优。针对这一状况, 元启发式算法被提出, 旨在合理的时间范围内获得比局部最优更好的结果。

### (3) 元启发式算法 (Metaheuristics solution)。

在大规模网络中, 寻找解决 VNE 的优化方法变得困难起来。精简式算法只适用于中小规模网络, 而启发式算法得到的结果只是局部最优解。元启发式算法的提出解决了这些问题。文献[15]使用的贪婪随机适应性搜索过程 (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, GRASP) 通常包括两个步骤: 创建和本地搜索。创建阶段需要创建出满足所有约束条件的随机方法; 本地搜索负责寻找与初始方法相关的本地优化方法。文献[17]应用的多目标粒子群优化算法, 对粒子群优化算法重新定义了一系列的参数, 包括位置、速

率、差集等,以更好地用于节能的目标。文献[23]则将蚁群优化算法应用到节能方案中。

1.5 映射性能指标

节能算法的映射是否成功与节能效果是否满足需求需要一系列的性能指标做评判。这些性能指标可以用于不同算法之间的对比。按照映射目的,将虚拟网络节能算法映射的性能指标分为以下几种:

1.5.1 能耗相关指标

能耗指标是虚拟网络节能算法的最主要指标。节能算法性能的优劣,主要看在底层网络中映射相同的虚拟网络请求时,在不影响正常通信的情况下,哪一种算法能够节省更多的能耗。

(1)节点能耗:底层网络中所有激活的底层节点的能耗。根据能耗模型的不同,不同的底层节点能耗可能会有不同。例如维持节点和转发节点,维持节点的能耗组成有基础能耗和维持虚拟节点的能耗,而转发节点只有基础能耗。

(2)链路能耗:底层网络中所有激活的底层链路的能耗。链路能耗可能与映射到这条链路上的虚拟链路所占带宽有关或是与链路所连接的两个节点间的距离有关。

(3)网络能耗:底层网络中所有激活的节点和链路的能耗。

(4)激活的节点数:底层网络中所有激活的节点数量。在节能算法中,激活节点定义为虚拟网络请求提供资源并维持其通信的节点,处于唤醒状态;而休眠节点称为非激活节点。

(5)激活的链路数:底层网络中所有激活的链路数量。激活的链路定义为连接两个激活节点并维持节点之间数据传输的链路。

(6)迁移能耗:在将一个已映射的虚拟网络重新映射到另一个实体期间,维持原虚拟网络通信的能耗。文献[8]定义了迁移能耗的概念,将这种能耗应用在对迁移敏感的网络中。

(7)节点开启能耗。一些算法认为,在节点从休眠状态激活转为唤醒状态时,需一个触发节点开启能耗,这个能耗区别于节点上的其他能耗并不可忽略。

1.5.2 服务质量相关指标

在虚拟网络映射的节能算法中,对于服务质量的要求只需要在网络负载较低的时段进行重新映射时不影响原有请求的正常通信或是在低负载时映射性能与非节能算法逼近。

(1)路径长度:定义为一个虚拟网络中的两个节点映射到底层节点上,连接这两个节点间的物理链路数量。

(2)延迟:数据包从一个节点传输到另一个节点

需要的时间。

(3)使用率:映射虚拟网络的底层资源量与底层网络总资源量之比。

1.5.3 其他指标

(1)算法运行时间:虚拟网络映射的完成时间,与映射的完成度和映射质量是一对矛盾。

(2)虚拟网络请求接收率:算法实际完成映射的虚拟网络请求与全部的虚拟网络请求之比。

(3)收益:虚拟网络需要的虚拟资源总数。

2 结束语

虚拟网络映射的绿色节能课题自兴起以来,已得到较为深入与广泛的开发与研究。在底层网络中,能量消耗的载体是物理实体,所以节能的基本思想是尽可能少地使用底层资源实现映射。文中主要对虚拟网络映射节能算法的研究及现状进行了调查。目前,虚拟网络映射的节能模型的种类已较为全面,有些研究中的能耗模型已经细化到网络端口的能耗上。节能的方法有节点节能和链路节能,应用于各种规模网络的节能方案已有了较多进展(例如应用在小规模网络的精简型算法,应用在中规模网络的启发式算法以及大规模网络的元启发式算法);然而节点与链路结合的节能方案还未得到充分研究。映射的性能指标也较为完备,能量效率的节能研究中也细化到了网络元件上。

日益严重的碳排放问题和能源危机,使得虚拟网络映射节能算法越来越受到重视,亦得到充分研究。目前,仍有如下问题和方向有待进一步研究:

(1)节点休眠和链路分割结合。

作为链路节能的一种可行方法,基于可分割链路的链路休眠能够较好地节省链路能耗。然而,在节点节能方案中,尚未有结合可分割链路的链路休眠的方案。考虑先使用节能方案解决节点映射,并且在链路映射时采取分割链路的做法,可以使得在一些节点满足约束条件时,解决链路不满足所需带宽约束的问题。

(2)方案中加入迁移能耗。

在一次虚拟网络请求的通信过程中,可能会出现个别的节点遇到异常中断工作的情况,需要重新为这个节点分配合适的资源,以维持正常通信。在中断的节点重新映射结束前,移动资源和维持额外链路的能耗需要考虑到算法中。文献[11]提出的算法考虑到了这种迁移能耗。

(3)节能算法的规模较小。

目前,节能算法的研究多集中于中小规模的网络中,适用于大规模网络的元启发式算法的研究较少。在大规模网络中应用网络虚拟化技术时,可以继续探索适合不同应用场景的虚拟网络映射的节能算法。

#### (4) 虚拟网络请求发生变化的情况。

在一些特殊情况下,可能面临虚拟网络请求中的某个节点先于其他节点结束通信,这样一来,这个虚拟节点将在虚拟请求中消失,不再消耗能量。文献[14]中考虑了这种案例的简单情况,并给出了一种重新分配资源的优化方案。在未来的研究中,可以深入探讨多个节点结束通信的情况,并给出性能更好的优化方案。

#### (5) 虚拟网络技术在光网络中的节能。

在光网络中,虚拟网络映射技术也得到了充分的研究和发展,相应的节能技术也被提出<sup>[24-26]</sup>。未来的节能算法也可以考虑应用到光网络当中。

#### 参考文献:

- [1] Fisher W, Suchara M, Rexford J. Greening backbone networks: reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links[C]//ACM SIGCOMM workshop on green networking. New Delhi, India: ACM, 2010: 29-34.
- [2] Botero J F, Hesselbach X, Duelli M, et al. Energy efficient virtual network embedding[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(5): 756-759.
- [3] Fischer A, Beck M T, de Meer H. An approach to energy-efficient virtual network embeddings[C]//IFIP/IEEE international symposium on integrated network management. [s. l.]: IEEE, 2013: 1142-1147.
- [4] Wang B, Chang X, Liu J, et al. Reducing power consumption in embedding virtual infrastructures[C]//GlobeCom Workshops. [s. l.]: IEEE, 2012: 714-718.
- [5] Su S, Zhang Z, Liu A X, et al. Energy-aware virtual network embedding[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(5): 1607-1620.
- [6] Zhang Z, Su S, Niu X, et al. Minimizing electricity cost in geographical virtual network embedding[C]//Global communications conference. [s. l.]: IEEE, 2012: 2609-2614.
- [7] Su S, Zhang Z, Cheng X, et al. Energy-aware virtual network embedding through consolidation[C]//IEEE conference on computer communications workshop. [s. l.]: IEEE, 2012: 127-132.
- [8] Guan X, Choi B Y, Song S. Topology and migration-aware energy efficient virtual network embedding for green data centers[C]//International conference on computer communication and networks. [s. l.]: IEEE, 2014: 1-8.
- [9] Guan X, Choi B Y, Song S. Energy efficient virtual network embedding for green data centers using data center topology and future migration[J]. Computer Communications, 2015, 69: 50-59.
- [10] Nonde L, Elgorashi T E H, Elmoghani J M H. Energy efficient virtual network embedding for cloud networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(9): 1828-1849.
- [11] Triki N, Kara N, Barachi M E, et al. A green energy-aware hybrid virtual network embedding approach[J]. Computer Networks, 2015, 91(C): 712-737.
- [12] Bianzino A P, Chaudet C, Rossi D, et al. A survey of green networking research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2012, 14(1): 3-20.
- [13] 陈晓华, 李春芝, 陈良育, 等. 主动休眠节点链路的高效节能虚拟网络映射[J]. 软件学报, 2014, 25(7): 1416-1431.
- [14] Sun G, Yu H, Anand V, et al. A cost efficient framework and algorithm for embedding dynamic virtual network requests[J]. Future Generation Computer Systems, 2013, 29(5): 1265-1277.
- [15] Lira V, Tavares E. Energy-aware mapping for dependable virtual networks[C]//International workshop on power and timing modeling, optimization and simulation. [s. l.]: IEEE, 2015.
- [16] Botero J F, Hesselbach X. Greener networking in a network virtualization environment[J]. Computer Networks, 2013, 57(9): 2021-2039.
- [17] Ghazisaeedi E, Huang C. Off-peak energy optimization for links in virtualized network environment[J]. IEEE Transactions on Cloud Computing, 2015(99): 1.
- [18] Ghazisaeedi E, Huang C, Yan J. Off-peak energy-wise link reconfiguration for virtualized network environment[C]//IFIP/IEEE international symposium on integrated network management. [s. l.]: IEEE, 2015: 814-817.
- [19] Ghazisaeedi E, Huang C. Energy-efficient virtual link reconfiguration for off-peak time[C]//2015 IEEE global communications conference. [s. l.]: IEEE, 2015: 1-7.
- [20] 王 博, 陈庶樵, 王志明, 等. 基于中心度寻核的能效优化虚拟网映射算法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(7): 2087-2091.
- [21] Shahin A A. Memetic multi-objective particle swarm optimization-based energy-aware virtual network embedding[J]. International Journal of Advanced Computer Science & Applications, 2015, 6(4): 1-12.
- [22] Huu T N, Ngoc N P, Thu H T, et al. Modeling and experimenting combined smart sleep and power scaling algorithms in energy-aware data center networks[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2013, 39(8): 20-40.
- [23] Guan X, Wan X, Choi B Y, et al. Ant colony optimization based energy efficient virtual network embedding[C]//IEEE international conference on cloud networking. [s. l.]: IEEE, 2015.
- [24] Nonde L, Elgorashi T E H, Elmoghani J M H. Green virtual network embedding in optical OFDM cloud networks[C]//16th international conference on transparent optical networks. [s. l.]: IEEE, 2014: 1-5.
- [25] Perello J, Pavon-Marino P, Spadaro S. Cost-efficient virtual optical network embedding for manageable inter-data-center connectivity[J]. ETRI Journal, 2013, 35(1): 142-145.
- [26] Melo M, Sargento S, Killat U, et al. Optimal virtual network embedding: energy aware formulation[J]. Computer Networks, 2015, 91(C): 184-195.