

基于网络熵的域内节能路由方案

张 举^{1,2} 耿海军^{1,2} 刘洁琦¹

(山西大学软件学院 太原 030006)¹ (网络与交换技术国家重点实验室 北京 100876)²

摘要 减少网络能耗和建立绿色网络已经成为学术界和工业界研究的关键科学问题。已有的节能方案均在已知流量矩阵的前提下展开研究,但是获得实时流量数据并不容易。因此,文中研究了如何在未知流量矩阵的情况下降低网络能耗,提出了一种基于网络熵的域内节能路由方案(Intra-domain Energy Efficiency Routing Scheme Based on Network Entropy, EERSBNE),该方案通过关闭网络中的链路来实现节能的效果。首先提出了链路关键度模型和网络熵模型,然后根据链路关键度计算网络中所有链路的重要程度,最后根据链路的重要程度和网络熵模型依次关闭网络中的链路。实验结果表明,该算法在降低网络能耗的同时不会引入较大的路径拉伸度。

关键词 网络熵,网络能耗,链路介数,链路关键度,路径拉伸度

中图分类号 TP309.7 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.02.012

Intra-domain Energy Efficiency Routing Scheme Based on Network Entropy

ZHANG Ju^{1,2} GENG Hai-jun^{1,2} LIU Jie-qi¹

(School of Software Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)¹

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing 100876, China)²

Abstract The reduction of network energy consumption and the building of green network have become key scientific problems in academic and industrial research. All the existing energy efficiency schemes carry out researches on the premise of knowing the traffic matrix, but it's not easy to get real-time traffic data. Therefore, this paper studied how to reduce the network energy consumption without knowing real-time traffic matrix, and presented an intra-domain energy efficiency routing scheme based on network entropy. This scheme achieves energy efficiency by turning off the links in network. Firstly, the link criticality model and the network entropy model are proposed. Then, the importance of all links in the network is calculated according to the link criticality. Finally, the links in the network are turned off in turn according to the importance of link and the network entropy model. The experimental results show that the proposed algorithm does not introduce larger path stretch when reducing the energy consumption of network.

Keywords Network entropy, Network energy, Link betweenness, Link criticality, Path stretch

随着互联网行业的高速发展,网络应用遍及日常生活中的方方面面,但网络中的流量和各种通讯设备随之迅猛增加,通信互联网行业的碳排放量也在高速增长。图 1 为沃达丰所统计的网络能耗组成。由图中可知,无线网络、移动电话网络、核心网络在互联网中的能耗占比分别位列前 3 名。本文所研究的内容为核心网络中的区域内网络,这也是能源消耗最为严重的方向之一。因此,能否在保证通信质量的前提下,减小域内网络的能量消耗成为一个很重要和现实的问题^[1-4]。

事实上,网络中的流量存在一定的规律性和差异性^[5],具体体现在时间和空间上。从时间上看,白天高峰期用户同时使用量会较大,而在夜间时用户同时使用量却大量减少;从空间上看,人员密集的地方和人员分散的地方也存在很大的差异,核心网通过的流量其实并不是一直处于高峰值。但为了

防止突发流量状况,互联网将峰值的流量设置为网络链路的带宽标准,从而导致网络链路中的带宽利用率很低,尤其在夜晚低峰期,骨干网络中平均链路使用带宽占有率不到 40%^[6],其他时刻链路的利用率则更低。另一方面,为了提高网络的可靠性和稳定性,在设计网络拓扑结构时,往往配置了大量的冗余链路^[7]。

基于以上分析可以看出,在保证网络一定性能的前提下,通过设计算法来减少网络的能耗是可行的。而学术界也针对网络节能算法进行了研究。总体来说,当前的绿色节能网络研究在方向上大体可分为两类: Sleeping 模式^[8]和 Speed scaling 模式^[9]。Sleeping 模式认为,设备的能耗主要在于端口或线卡的开关,而与流经端口的流量没有关系,也被称为 on/off 模型(开/关模型)。Speed scaling 模式则相反,它认为

到稿日期:2018-03-09 返修日期:2018-05-10 本文受国家自然科学基金(61702315),网络与交换技术国家重点实验室(北京邮电大学)开放课题资助项目(SKLNST-2018-1-19)资助。

张 举(1972-),男,硕士,讲师,主要研究方向为 SDN 网络和路由算法等;耿海军(1983-),男,博士,讲师,主要研究方向为网络体系结构和路由算法等,E-mail:ghj123025449@163.com(通信作者);刘洁琦(1995-),男,主要研究方向为路由算法。

设备消耗的能耗与流经端口的数据量有关系,流量大则耗能大,流量小则耗能小。在该模式中,网络中流量的不规则变化使得该类算法难以得到准确的流量输入参数,只能得到一个近似解,这些因素导致该模式的算法在实际应用中不易部署。

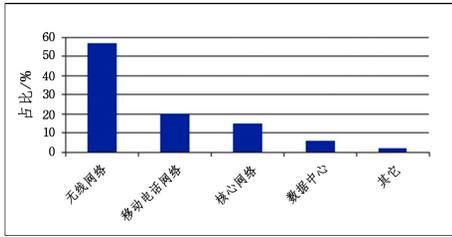


图 1 沃达丰统计的网络能耗

Fig. 1 Network energy consumption provided by Vodafone

在上述两种模式中,已有方法几乎都需要考虑网络中的流量矩阵。在已知流量矩阵的基础上,首先根据网络拓扑结构建立节能模型,然后将求解该模型归结为求解整数规划问题,最后利用启发式算法求取近似解^[10-13]。然而实际研究表明,获取互联网实时流量并不是一件简单的事情,因此这些方法很难在互联网中实际部署。基于上述讨论,本文主要解决如何在不需要流量矩阵的前提下,仅仅根据网络拓扑结构计算一种较优的节能方案。本文提出的基于网络熵的域内节能路由方案属于 Sleeping 模型,在算法中只需要输入拓扑结构即可,不需要网络中的实时流量矩阵。而拓扑结构相对于流量的频繁变化则稳定得多,也更易于部署。本文的贡献主要包括以下几个方面:1)提出了一种基于网络熵的域内节能路由保护方案;2)建立了网络中链路关键度模型;3)利用网络熵的概念衡量了网络性能的变化,进而保证网络的质量。实验结果表明,所提方法不仅可以保证网络的性能,还可以大幅降低网络能耗。

本文第 1 节对本文解决的问题进行了详细描述;第 2 节介绍了具体的解决方案;第 3 节在大量拓扑中模拟本文的算法;最后总结全文。

1 问题描述

网络可以用一个图 $G=(V,L)$ 来表示,其中 V 为拓扑中的节点集合, L 为边的集合。对于网络中的任意一条边 $e=(u,v) \in L$,用 $w(e)=w(u,v)$ 表示该边的代价,用 $X(e)$ 表示该边消耗的能量。对于网络中任意两个不相同的节点 u 和 v , $sp(u,v)$ 表示这两个节点之间的最短路径包含的边的集合。

本文研究的问题可以描述为:给定一个网络拓扑结构 $G=(V,L)$,如何在保证网络性能的前提下,通过关闭链路,使得节能最大化。该问题可以形式化表示为:

输入:网络拓扑结构 $G(V,E)$ 和网络性能 Ω

输出:关闭链路的集合 U

目标: $Maximize \sum_{e \in U} x(e)$

条件: $L \supseteq U$ 并且 $R \geq \Omega$,其中 R 代表标准网络熵。

2 算法

本文研究的节能方案是通过关闭链路来达到节能的目的。但是对于任意一个网络拓扑结构,若将部分链路关闭,则

网络的性能必然会受到一定程度的影响。因此算法首先需要解决以下两个问题:1)网络中链路的重要程度是不相同的,如何度量链路的重要性,根据链路重要性选择关闭哪些链路。2)关闭链路后,网络是否还保持连通;如果网络还保持连通,如何判断网络的性能是否在可接受范围内。

2.1 链路关键度模型

针对问题 1),本文提出利用链路关键度模型来衡量链路的重要程度,可以用下式来表示:

$$I(l) = a * \frac{B(l) - B_{\min}}{B_{\max} - B_{\min}} + (1 - a) * \left(\frac{1}{X(l)} - \frac{1}{X_{\max}} \right) / \left(\frac{1}{X_{\min}} - \frac{1}{X_{\max}} \right)$$

其中, $B(l)$ 为链路介数, B_{\max} 和 B_{\min} 分别代表链路介数的最大值和最小值, X_{\max} 和 X_{\min} 分别代表链路能耗的最大值和最小值。 $a(a \in [0,1])$ 为调节因子,可以控制介数和能耗在网络中的重要性。从上式可以看出,链路在拓扑中的重要性及其对应的能耗成为算法中主要考虑的两个因素,其重要性越高,说明对网络性能的影响越大,越不应该将其关闭。而对于链路的能耗来说则相对简单,能耗越大,算法越应该将其关闭。可见,链路重要度与介数正相关,与链路能耗负相关,链路的关键度越低,越被优先关闭。链路的介数可以表示为:

$$B(l) = \sum_{\substack{i \in sp(o,d) \\ o,d \in V}} K(l,o,d), K(l,o,d) = \begin{cases} 1, & l \in sp(o,d) \\ 0, & \text{else} \end{cases}$$

链路介数的计算方法如下:通过 Dijkstra 算法求出网络拓扑中各个节点的最短路径树,再据此求出各个节点到其他节点的最短路径,最后统计每条边在这些最短路径中出现的次数,从而计算出每条边对应的介数。

2.2 网络熵模型

针对问题 2),传统上对计算机网络性能的衡量指标主要有时延、带宽等参数,但这些参数在实验中均不容易得到。本文利用网络熵^[14]来衡量网络的性能,可以用下式表示:

$$E = \sum_{i=1}^{|V|} d(i) * \ln d(i)$$

其中, $d(i)$ 为某节点 i 的度。

下面我们研究网络熵对应的一些性质:

1)网络熵是一个递增函数;

2)网络熵的最小值为 $E_{\min} = 2 * (n-2) \ln 2$;

3)网络熵的最大值为 $E_{\max} = n * (n-1) \ln(n-1)$, $n \geq 2$ 。

网络熵因为数值变化范围较大,所以不太适合作为网络连通度的评价指标。因此,本文通过标准网络熵来衡量网络的连通性。

标准网络熵可以定义为:

$$R = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}}$$

下面是标准网络熵的一些性质:

1) $0 \leq R \leq 1$;

2)标准网络熵的数值越大,网络的连通性能越好,反之网络的连通性越差。

由标准网络熵的公式可知,拓扑中各节点的度越大,标准网络熵越高,也说明网络的连通性越好。当关闭链路时,相当于减小了节点的度,会导致网络连通性的下降,也就会影响网络的性能。

2.3 节能算法 EERSBNE

算法 1 详细描述了节能方法的执行过程。算法 EERSBNE 的输入为网络拓扑 $G=(V,E)$ 和网络性能 Ω , 输出为关闭链路集合 $U(U \subset L)$ 。首先进行初始化操作: 计算网络中所有链路的关键度并且按照降序排列, 将排序后的链路存储在队列 Q 中(算法第 1-3 行); 将关闭链路的集合初始化为空集, 计算初始标准网络熵(算法第 4-7 行)。接着进行一系列的迭代过程。当队列不为空时, 从队列的头部取出一个元素 l , 并将该链路从网络中删除(算法第 9-10 行)。然后判断此时的网络是否连通, 若不连通则将该链路重新插入到网络中(算法第 20 行); 若此时网络是连通的, 则计算网络熵。若网络熵低于设定的标准, 则将该链路重新插入到网络中; 若网络熵高于设定的标准, 则更新删除链路的集合(算法第 12-18 行)。最后输出关闭链路的集合 $U, U \subset L$ (算法第 23 行)。

算法 1 EERSBNE 算法

Input: 网络拓扑 $G=(V,E)$, 网络性能 Ω

Output: 关闭链路集合 $U(U \subset L)$

1. 计算网络中所有链路的关键度
2. 根据链路关键度对链路进行降序排列
3. 将排序后的链路存储在队列 Q 中
4. $U \leftarrow \emptyset$
5. 计算初始标准网络熵 R
6. $R' \leftarrow R$
7. $L' \leftarrow L$
8. While Q 不为空 do
9. 从队列 Q 中取出第一个元素 l
10. $G'=(V, L'-l)$
11. If IsConnect(G') then
12. 计算网络熵 E'
13. If $R' \geq \Omega$ then
14. $L' \leftarrow L'-l$
15. $U \leftarrow U \cup l$
16. else
17. $G'=(V, L')$
18. EndIf
19. else
20. $G'=(V, L')$
21. EndIf
22. EndWhile
23. Return U

2.4 算法举例

下面通过一个例子来说明算法 EERSBNE 的执行过程, 在该例子中假设 $a=0.5, \Omega=0.5R$ 。图 1 表示一个包含 4 个节点和 4 条边的网络拓扑结构, 图中每条边上包含两个数字, 其中第一个数字表示该边的代价, 另外一个数字表示该边的能耗。根据 2.1 节中定义的公式可知, 网络中链路的介数分别为 $B(a,c)=4, B(a,b)=3, B(c,d)=3, B(b,d)=2$ 。网络中链路的关键度分别为 $I(a,c)=0.5*(1+1)=1, I(a,b)=0.5*(0.5+1)=0.75, I(c,d)=0.5*(0.5+0)=0.25, I(b,d)=0.5*(0.5+1/3)=0.17$ 。初始标准网络熵 $R=$

$\frac{E-E_{\min}}{E_{\max}-E_{\min}} = \frac{8\ln 2 - 4\ln 2}{12\ln 3 - 4\ln 2} = 0.293$ 。因此当关闭关键度数值最小的链路(b,d)时, 对应的网络熵 $R'=0$, 则该网络不能关闭任何链路。

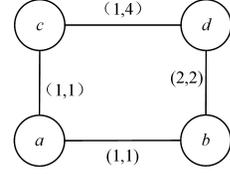


图 2 网络拓扑

Fig. 2 Network topology

2.5 算法讨论

本文提出的算法既可以采用集中式方案实现, 也可以采用分布式方案实现。当采用集中式方案时, 需要部署一台控制器, 在该控制器上执行 EERSBNE。当采用分布式方案时, 每个节点都需要运行 EERSBNE, 开销比较大。因此, 本文的算法可以采用 SDN^[15] 技术实现。算法 1 第 1-7 行中时间复杂度最大的为第 1 行, 该行为计算网络中所有链路的关键度, 计算的时间复杂度为 $|V|O(|V|\lg|V|+|E|)$ 。因此算法 1 第 1-7 行的时间复杂度为 $|V|O(|V|\lg|V|+|E|)$ 。算法 1 第 8-22 行中最坏情况为需要关闭 $|E|-|V|+1$ 条链路, 每关闭一条链路都需要判断网络的连通性。判断网络连通性的复杂度为 $O(|V|+|E|)$ 。因此, 算法 1 中第 8-22 行的时间复杂度为 $(|E|-|V|+1)*O(|V|+|E|)$ 。综上所述, 算法 EERSBNE 的时间复杂度为 $|V|O(|V|\lg|V|+|E|) + (|E|-|V|+1)*O(|V|+|E|)$ 。

3 实验

本节将通过实验来测试算法的性能。下面首先介绍实验方法和实验参数, 然后描述实验结果, 并总结实验结论。本实验重点研究了节能和网络熵, 以及节能和链路关键度调节因子 a 之间的关系。

3.1 实验方法

1) 实验拓扑

为了评估算法的性能, 使得实验结果更加真实可靠, 在不同的拓扑结构上进行模拟, 拓扑参数如表 1 所列。

表 1 实验使用的拓扑结构

Table 1 Network topology used in experiment

网络拓扑	结点数量	链路数量
Abilene	11	14
TORONTO	25	55
USLD	28	45
Exodus	79	147
Tiscali	161	328
Sprint	315	972

2) 线卡能耗

为了真实反映网络中链路的能耗, 采用文献中的参数来设置链路的能耗。不同类型的线卡对应的能耗如表 2 所列, 此处设线卡功耗为一个定值, 不随流量变化而变化^[7]。另外, 由于在拓扑中无法得到每条链路对应的线卡, 因此算法中拓

扑链路所对应的线卡的能耗将被随机产生。

表 2 线卡和其对应的能耗

Table 2 Line cards and their energy consumption

线卡类型	能耗/W
OC-3	60
OC-12	80
OC-48	140
OC-192	174

3.2 实验结果

由第 2 节的描述可知,本文所提算法的节能大小与两个参数密切相关,即网络熵和调节因子 a ,因此在实验中我们将分别研究这两个参数和节能比率的关系。在实验中,网络熵比率 = 网络熵/初始网络熵,节能比率 = 网络能量/初始网络能量。

3.2.1 调节因子和节能的关系

本节研究当固定网络熵时,调节因子和节能比率之间的关系。图 3—图 5 分别描述了当网络熵比率为 0.3,0.5,0.8 时对应的调节因子和节能之间的关系。

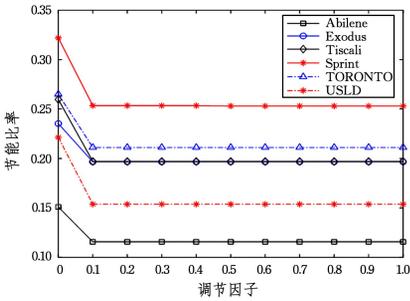


图 3 网络熵比率为 0.3 时调节因子和节能比率的关系

Fig. 3 Relationship between regulator and energy saving ratio when network entropy ratio is 0.3

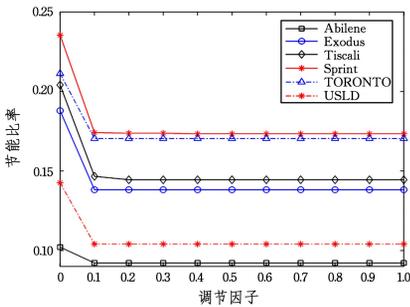


图 4 网络熵比率为 0.5 时调节因子和节能比率的关系

Fig. 4 Relationship between regulator and energy saving ratio when network entropy ratio is 0.5

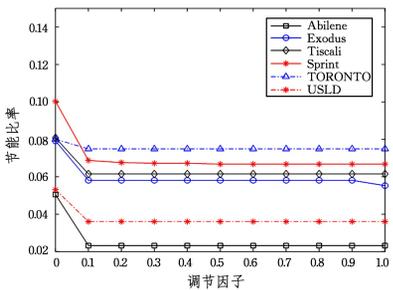


图 5 网络熵比率为 0.8 时调节因子和节能比率的关系

Fig. 5 Relationship between regulator and energy saving ratio when network entropy ratio is 0.8

从图中可以看出,当网络熵降低时,节能比率随之增加。固定网络熵的数值,当调节因子 $a < 0.1$ 时,节能比率和调节因子呈反比例关系;当调节因子 $a \geq 0.1$ 时,节能比率几乎不随调节因子的变化而变化。

3.2.2 网络熵和节能的关系

本节研究当固定调节因子的数值时,网络熵比率和节能比率之间的关系。图 6 表示当调节因子 $a = 0.1$ 时,网络熵和节能之间的关系。由该图可知,随着网络熵的逐渐增加,节能比率逐渐降低,这是因为当网络熵增加时,关闭链路的数量减少。

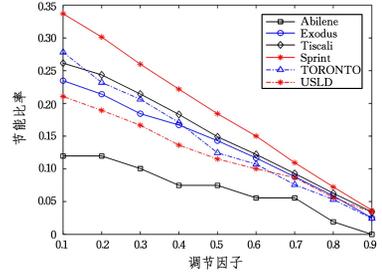


图 6 调节因子为 0.1 时网络熵比率和节能比率的关系

Fig. 6 Relationship between network entropy ratio and energy saving ratio when regulator is 0.1

3.2.3 路径拉伸度

关闭网络中的链路后,网络中的路径拉伸度可能会增加。因此,本节分别研究调节因子、网络熵和路径拉伸度之间的关系。

图 7—图 9 分别表示当节能比率为 0.3,0.5,0.8 时对应的调节因子和路径拉伸度之间的关系。根据实验可以看出,网络熵比率和路径拉伸度呈反比例关系。固定网络熵比率,当调节因子 $a < 0.1$ 时,路径拉伸度和调节因子呈反比例关系;当调节因子 $a \geq 0.1$ 时,路径拉伸度几乎不随调节因子的变化而变化。图 10 描述了当调节因子为 0.1 时网络熵比率和路径拉伸度的关系。由图 10 可知,随着网络熵比率的增加,路径拉伸度降低。

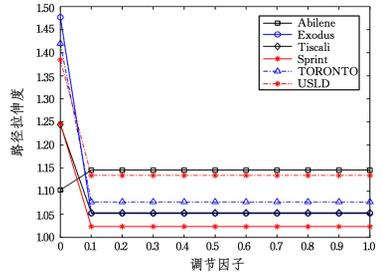


图 7 网络熵比率为 0.3 时调节因子和路径拉伸度的关系

Fig. 7 Relationship between regulator and stretch when network entropy ratio is 0.3

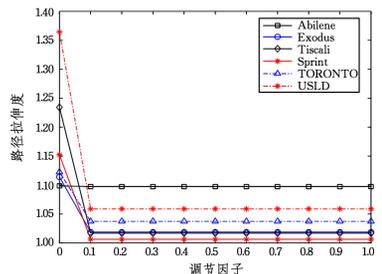


图 8 网络熵比率为 0.5 时调节因子和路径拉伸度的关系

Fig. 8 Relationship between regulator and stretch when network entropy ratio is 0.5

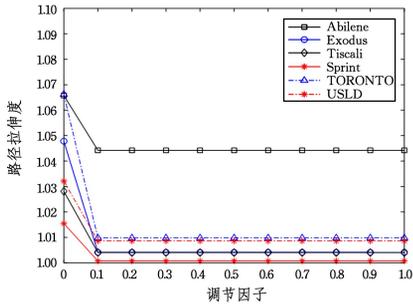


图9 网络熵比率为0.8时调节因子和路径拉伸度的关系

Fig.9 Relationship between regulator and stretch when network entropy ratio is 0.8

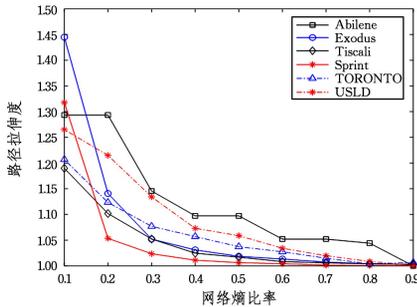


图10 调节因子为0.1时网络熵比率和路径拉伸度的关系

Fig.10 Relationship between network entropy ratio and stretch when regulator is 0.1

从图7—图10可知,在所有实验网络拓扑中,路径拉伸度的数值始终小于1.5。根据上述实验可知,当网络熵比率为0.5且调节因子为0.1时,节能比率和路径拉伸度可以很好地折衷,因此在实际部署中推荐使用上述两个参数。

结束语 本文提出了一种简单的域内节能路由算法,该算法仅仅需要网络的拓扑结构信息,而不需要实时流量数据。该算法利用链路关键度模型来衡量链路的重要程度,利用网络熵来评价由于关闭链路造成的网络性能下降程度。然而,本文并没有将可再生能源考虑在节能算法中,这也是下一步的重点研究方向。

参考文献

[1] GUPTA M, SINGH S. Greening of the internet [C] // Proceedings of ACM Special Interest Group on Data Communication. Karlsruhe, Germany: ACM Press, 2003: 19-26.

[2] XU M, SHANG Y, LI D, et al. Greening data center networks with throughput-guaranteed power-aware routing [J]. Computer Networks, 2013, 57(15): 2880-2899.

[3] YANG Y, WANG D, PAN D, et al. Wind blows, traffic flows: Green Internet routing under renewable energy [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Commu-

nications. San Francisco, CA: IEEE Press, 2016: 1-9.

- [4] MINERAUD J, WANG L, BALASUBRAMANIAM S, et al. Hybrid renewable energy routing for ISP networks [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications. San Francisco, CA: IEEE Press, 2016: 1-9.
- [5] ZHANG G Q, XU Z Q, LIU Z. Research on Green Network Theory and Technology [J]. Journal of Software, 2016, 27(3): 736-759. (in Chinese)
- 张国强, 许自取, 刘真. 绿色网络理论与技术研究 [J]. 软件学报, 2016, 27(3): 736-759.
- [6] BOLLA R, BRUSCHI R, CIANFRANI A, et al. Enabling backbone networks to sleep [J]. IEEE Network, 2011, 25(2): 26-31.
- [7] CHABAREK J, SOMMERS J, BARFORD P, et al. Power Awareness in Network Design and Routing [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications. Honolulu, USA: IEEE Press, 2008: 457-465.
- [8] CHIARAVIGLIO L, CIULLO D, MELLIA M, et al. Modeling sleep mode gains in energy-aware networks [J]. Computer Networks, 2013, 57(15): 3051-3066.
- [9] ANDREWS M, ANTA A F, ZHANG L, et al. Routing for Energy Minimization in the Speed Scaling Model [C] // Conference on Information Communications. IEEE Press, 2010: 2435-2443.
- [10] CHIARAVIGLIO L, MELLIA M, NERI F. Minimizing ISP Network Energy Cost: Formulation and Solutions [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2012, 20(2): 463-476.
- [11] YANG Y, XU M, WANG D, et al. A Hop-by-hop Routing Mechanism for Green Internet [J]. IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems, 2015, 27(1): 2-16.
- [12] CHIARAVIGLIO L, CIANFRANI A, ROUZIC E L, et al. Sleep modes effectiveness in backbone networks with limited configurations [J]. Computer Networks the International Journal of Computer & Telecommunications Networking, 2013, 57(15): 2931-2948.
- [13] ZHANG M, YI C, LIU B, et al. GreenTE: Power-aware traffic engineering [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols. Kyoto, Japan: IEEE Press, 2010: 21-30.
- [14] WU L S. Research on the Network Reliability Based on Network Entropy [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- 吴六三. 基于网络熵的网络可靠性研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [15] KREUTZ D, RAMOS F M V, ESTEVES V P, et al. Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey [J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14-76.