

# 复杂大电网下基于分层 PCE 的跨域分离 通信路径建立机制

吴润泽, 吕文涛, 唐良瑞

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

## A Construction Mechanism of Cross-domain Disjoint Communication Path Based on Hierarchical PCE in Complex Large Power Grid

WU Runze, LV Wentao, TANG Liangrui

(School of Electric & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**摘 要:** 随着多域电力通信网络环境的出现, 基于约束的跨域保护路径计算变得极其复杂, 严重影响电力通信网业务可靠性。通过对路径计算单元 (PCE) 的研究分析, 提出一种基于分层 PCE 的节点并行资源预留跨域分离路径建立方法 (HPCE-PNC)。首先父 PCE 利用源节点、目的节点和各域边界节点组成的虚拓扑计算一组源节点到目的节点的不相交虚路径对。然后子 PCE 将经过本域的虚路径段映射为物理路径段, 并将链路资源信息发给父 PCE。最后父 PCE 计算出相交的完整物理路径对集合并选择一个代价最小的不相交路径对分别作为工作路径和备份路径, 并对该不相交路径对分配资源, 将路径结果发送至各个节点进行并行资源配置。仿真结果显示, 该方法具有较高的建路成功率和较短的建路时延。

**关键词:** 大电网; 电力通信网; 可靠性; 路径计算单元; 多域路由

**Abstract:** With the emergence of multi-domain electric power communication network, the calculation of cross-domain protection path based on constraints becomes extremely complex, which seriously affect the reliability of electric power communication network services. Through the research and analysis of path computation element (PCE), a construction method of disjoint path based on hierarchical PCE with parallel node configuration (HPCE-PNC) is provided in this paper. At first, the parent PCE apply the virtual topology which consists of source node, the destination node and boundary nodes of each domain to calculate a set of disjoint virtual paths from source node to the destination node. Then, the child PCE maps to physical path segments through the virtual path segments, and delivers the resource

information of the links to parent PCE. In the end, the parent PCE calculates the set of disjoint complete physical paths and selects a pair of disjoint paths with minimum cost as working path and backup path, and allocates resource to the disjoint paths pair. Therefore, the path results are transmitted to each node and configure parallel resource. Simulation results show that the algorithm have a high rate of path establishing and a small setup delay.

**Keywords:** large power grid; electric power communication networks; reliability; PCE; multi-Domain Routing

## 0 引 言

随着社会和科技发展, 区域性电力系统互联形成超大规模电网, 从远方电站群到受端电网形成特高压、超高压、高压的电力网络层次结构。为满足复杂大电网快速增长的通信需求, 电力通信网开始采用新型波分复用(WDM)设备, 向光纤波分复用智能网状网演进, 形成了区域主干通信网、省骨干网和地区通信网多层多域光网络结构。其中, 省骨干光通信网主要接入站点为: 省级调度机构、省级生产单位、500kV 变电站、少部分 220kV 变电站、500kV 接入电厂; 地区通信网主要接入点为: 地区调度机构、地区生产单位、地区辖区内变电站、辖区内 220kV 及以下接入电厂<sup>[1]</sup>。就一个省级电网来说, 其对应的电力信息网络就是一个大型的复杂的网络。在这样的网络中, 路由策略的选择、拓扑结构的优化是极为重要的课题。

随着多域电力通信光网络环境的出现, 基于约束的跨域保护路径计算变得极其复杂, 大量的这种

**基金项目:** 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (13MS01)

计算需求对路由节点造成了巨大的冲击，严重影响了路由节点的运行效率。为了减轻路由节点的负荷，提高网络运行效率和质量，IETF 提出了用路径计算单元(path computation element, PCE)专门负责各种复杂路径的计算<sup>[2]</sup>。IETF 给出了两种跨域路径的计算方法，一种是逐域路径计算方法<sup>[3]</sup>，另一种是基于 PCE 的(反向递归计算方法(backwards-recursive PCE-based computation, BRPC)方法<sup>[4]</sup>。文献 [5] 提出了基于分层 PCE 的多域网络结构。文献 [6] 提出一种具有路由和波长分配功能的 PCE 结构，在 PCEP 协议<sup>[7]</sup>中加入波长分配对象(WA)。文献 [8] 提出了基于 BRPC 的不相交路径联合计算方案(SD-PCE)，但计算过程复杂且路径上每个节点都进行资源配置，建路时间长。文献 [9] 提出了一种子域并行资源预留方案 pH-PCE 算法，该方法采用域内节点并行资源配置，虽然减少了资源配置节点个数，但建路时间依然较长。

针对多域网络中建立分离路径过程复杂和建路时间长问题，本文提出了一个基于分层 PCE 的节点并行资源预留跨域保护路径建路方案 HPCE-PNC(RWA based on hierarchical PCE with parallel node configuration)。首先，利用父 PCE 计算一组源节点到目的节点的不相交虚路径对。然后，子 PCE 将经过本域的虚路径段映射为物理路径段，并将链路资源信息发给父 PCE。最后，父 PCE 计算并选择一个代价最小的不相交路径对分别作为工作路径和备份路径，并对该不相交路径对分配波长资源，将路径结果发送至各个节点进行并行资源配置，最终实现快速跨域分离路径建立。

# 1 网络模型

## 1.1 分层 PCE 框架结构

分层 PCE 框架由路径计算客户端(path computation client, PCC)、路由节点、负责计算域内路径的子域 PCE 和负责计算域间路径的父 PCE 组成，如图 1。它们利用 PCEP 协议会话协同完成跨域路径计算。

在分层 PCE 框架结构中，PCEP 适配器实现 PCEP 协议会话管理。路径计算引擎调用算法库中相应的路径计算算法如 CSPF 算法、Bhandari 算法、surballe 算法等计算约束路径。波长分配单元对计算出的完整路径进行波长分配。流量工程数据

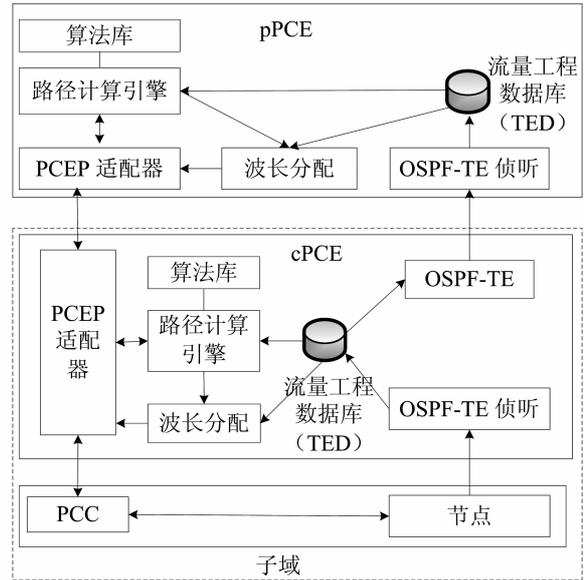


图 1 分层 PCE 框架结构

库(TED)分为两种：子 PCE 的 TED 负责管理维护本域内节点连接信息和链路状态信息；父 PCE 的 TED 负责管理维护各域边界节点间的虚连接信息、各域边界节点间虚链路状态信息和域间链路状态信息。

## 1.2 网络结构

假设一个省有 A、B、C 3 个地区。其电力通信骨干网由省级调度机构、省级生产单位、500kV 变电、500kV 接入电厂共 9 个节点组成，分布在 3 个地区。地区 A 有地区调度机构、地区生产单位、地区辖区内变电站、辖区内 220kV 及以下接入电厂共 4 个汇聚节点，地区 B 无汇聚节点，地区 C 有 2 个汇聚节点。本文将分布在各地区的骨干节点作为边界节点，结合本地区内汇聚节点组成一个区域网络，形成了由域 A、域 B 和域 C 3 个区域网络组成的多域光网络结构，如图 2 所示。

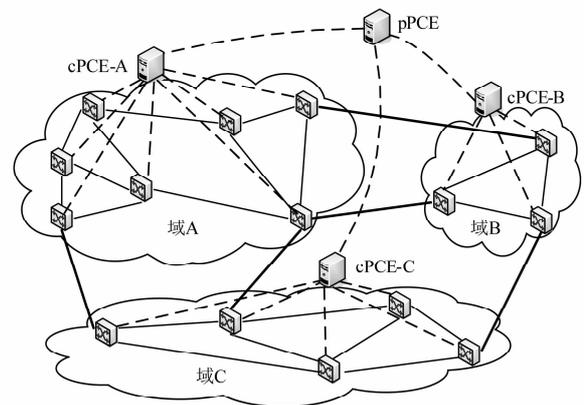


图 2 多域网络结构

## 2 算法描述

### 2.1 问题分析

在多域网络中，计算端到端的跨域分离路径问题实质上是在一对给定的源节点  $s$  和目的节点  $d$  间计算出端到端的两条不相交路径的问题，简称 2DP (two disjoint paths) 问题。计算出的两条不相交路径分别用  $P_1$  和  $P_2$  表示，其路径代价分别  $W(P_1)$  和  $W(P_2)$ ，并且保证  $\min \{W(P_1)+W(P_2)\}$ 。

同时，业务因资源的占用或冲突而引发的阻塞在很大程度上与建立业务的时延是分不开的，即路径的建路时延与业务的阻塞率息息相关。一条光路的建路时延由这 3 个阶段的时延组成，包括算路时延、波长分配与配置时延和链路时延。其中节点进行波长配置时，所耗费的时间是很长的，对于光交叉连接器 OXC 而言，配置每个节点的波长大约耗时 10~15ms，是建路时延中的主要部分，路径上的节点越多，配置节点耗时就越长，业务阻塞风险就更大。

### 2.2 HPCE-PNC 跨域保护路径建立步骤

#### 2.2.1 建路过程

针对 2.1 的问题，本文提出了一个基于分层 PCE 的节点并行资源预留跨域保护路径建路方案 (HPCE-PNC)，可以实现快速跨域生存路径的建立。该方法的建路过程如图 3，具体步骤如下：

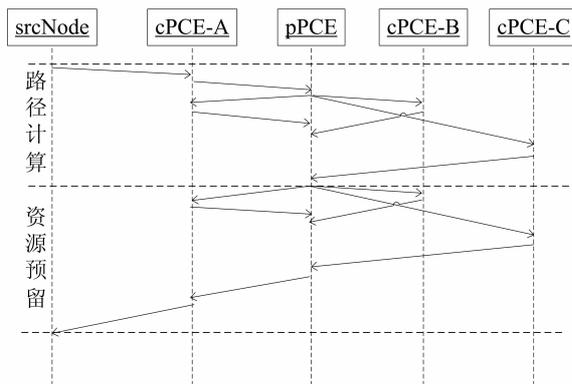


图 3 跨域分离路径建立过程

①源节点向子 PCE 发起跨域路径请求。

②子 PCE 收到跨域路径请求消息 PCReq 后，使用合适的算法，如受限最短路径算法 (CSPF)，分别计算源节点到边界节点的最短受限路径，并组成不相交虚拟最短路径树 (DVSPT)，将其发送至

父 PCE。

③父 PCE 将 DVSPT 与 TED 中的虚拓扑拼接成的新的虚拓扑，使用 Bhandari 算法或 surballe 算法计算一个源节点到目的节点的不相交虚路径对集合，将计算结果送至虚路径经过的域内子 PCE。

④子 PCE 根据虚路径段计算物理路径段及链路资源，将结果发给父 PCE。

⑤父 PCE 计算拼接成完整路径，选择一个代价最小的不相交路径对分别作为工作路径和备份路径，并进行资源分配，将结果发送个相应的各个子 PCE 请求资源配置。

⑥子 PCE 向路径段上的各个节点请求资源配置。

⑦各节点进行资源配置，并将结果发送给相应的子 PCE。

⑧各子 PCE 向父 PCE 返回资源配置结果信息。

⑨父 PCE 向源节点域子 PCE 返回路径结果。

⑩源节点域子 PCE 向源节点返回路径结果。

#### 2.2.2 时延分析

通过 HPCE-PNC 方法简化了跨域分离路径计算过程，同时将资源配置节点的个数减少至 1 个，缩短了建路时延。假设一个请求路径，经过的域个数为  $M$ ，节点数为  $N$ ，则由跨域保护路径建立过程知其建路时延为

$$T_{\text{setup}} = 2T_{r,N} + 2T_{p,r} + 2\max \{T_{p,i}, 1 \leq i \leq M\} + 2\max \{T_{i,j} + T_{p,i}, 1 \leq i \leq M \text{ 且 } 1 \leq j \leq N_i\} + 2T_{p,\text{COMP}} + T_{c,\text{COMP}} + T_{\text{RSVP}}$$

式中： $T_{r,N}$ 为源节点所在域子 PCE 与源节点间的通信时延； $T_{p,r}$ 为父 PCE 与源节点域内子 PCE 之间的传输时延； $T_{i,j}$ 为第  $i$  域的子 PCE 与  $i$  域内节点  $j$  之间的通信时延； $T_{p,i}$ 为父 PCE 与第  $i$  域内子 PCE 之间的传输时延； $T_{p,\text{COMP}}$ 为父 PCE 算路时延； $T_{c,\text{COMP}}$ 为子 PCE 算路时延； $T_{\text{RSVP}}$ 为节点资源预留时延。

### 2.3 算例分析

以图 1 中的网络为例，其物理拓扑如图 4，单向链路波长数为 16，该网络由域 A、域 B、域 C 3 个域组成。域 A 由 2、8、11 三个边界节点和 0、1、9、10 四个域内节点组成。域 B 由 3、4、12 三个边界节点组成。域 C 由 5、7、14 三个边界节点和 6、13 两个域内节点。父 PCE 中 TED 获取的虚拓扑如图 5，虚链路为边界节点间为代价最小路径，

该路径中间不经过其他边界节点。

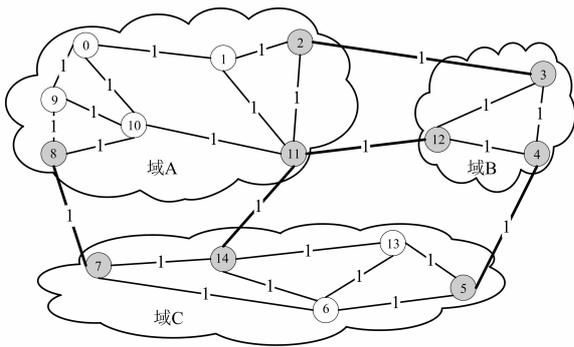


图4 多域网络物理拓扑

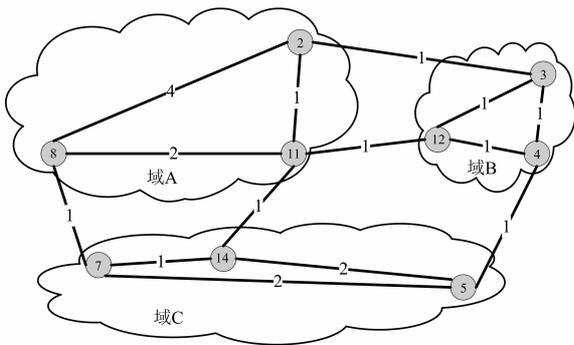


图5 多域网络虚拓扑

假设链路基本代价均为1，以节点0作为源节点，节点6作为目的节点。则建立跨域路径步骤：

① 源节点0请求域A内的子PCE。

② 域A内的子PCE向父PCE请求路径，将源节点0到边界节点2、8、11的不相交的虚拟最短路径树(DVSPT) $\langle 0-2(2), 0-8(2), 0-11(2) \rangle$ 发给父PCE。

③ 父PCE将源节点到边界节点的虚链路与虚拓扑组成新的虚拓扑，如图6所示，父PCE根据新的虚拓扑计算源节点到目的节点的不相交虚路径对集合  $\{ \langle 0-8-7-6, 0-11-14-6 \rangle, \langle 0-11-14-6, 0-2-3-4-5-6 \rangle, \langle 0-8-7-6, 0-2-3-4-5-6 \rangle \}$ ，将路径集合发送至路径经过的各个子域PCE。

④ 各个子域PCE计算经过该域的虚路径映射成物理路径，将路径及链路资源发送给父PCE。

⑤ 父PCE将各域路径段进行拼接，获得端到端的不相交路径集合  $\{ \langle 0-9-8-7-6(4), 0-11-14-6(4) \rangle, \langle 0-11-14-6(4), 0-1-2-3-4-5-6(6) \rangle, \langle 0-9-8-7-6(4), 0-1-2-3-4-$

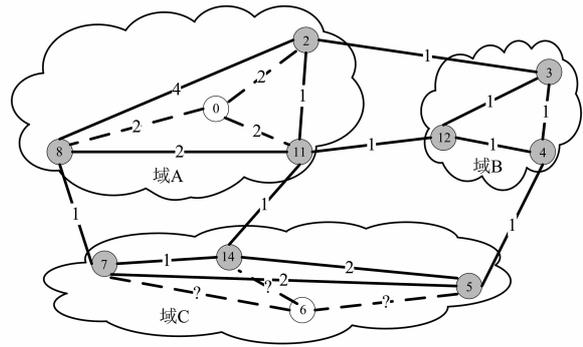


图6 DVSPT与TED中虚拓扑组成的新虚拓扑

$5-6(6) \rangle$ ，选择代价最小的不相交路径对  $\langle 0-9-8-7-6(4), 0-11-14-6(4) \rangle$ 。对路径分配资源，请求域内子PCE进行资源配置。

⑥ 子PCE向域内路径段上的各个节点发送资源配置请求。

⑦ 路径上的各节点向域内子PCE返回资源配置确认信息。

⑧ 子PCE向父PCE返回资源请求确认信息。

⑨ 父PCE将相互分离的路径对  $\langle 0-9-8-7-6(4), 0-11-14-6(4) \rangle$  发送给源节点域子PCE。

⑩ 源节点域子PCE将相互分离的路径对  $\langle 0-9-8-7-6(4), 0-11-14-6(4) \rangle$  发送给源节点0。

在HPCE-PNC方法中，源节点域子PCE在请求路径时，将源节点到请求域边界节点的不相交虚路径树(DVSPT)发送给父PCE。父PCE将DVSPT与TED中的虚拓扑组成新的虚拓扑，路径计算引擎根据新的虚拓扑计算出源节点到目的节点的不相交虚路径对集合，子PCE计算经过该域的不相交路径段。通过这种方法实现跨域保护路径的建立。其中通过向父PCE发送源节点到请求域边界节点的不相交虚路径树(DVSPT)减少父PCE计算源节点到目的节点的不相交虚路径集合的复杂度。在HPCE-PNC方法中，使用具有波长分配(WA)功能的PCE，实现路径上各个节点并行资源分配，减少建路时间，避免前向预留与后向预留中波长连续性限制问题。

### 3 仿真分析

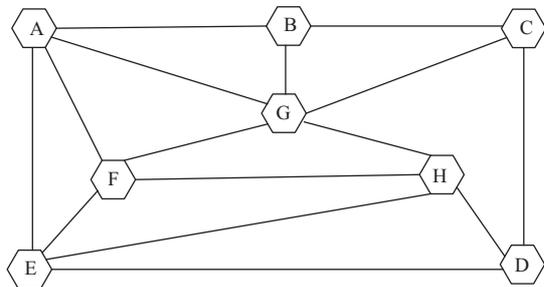
为了验证论文所提出的改进的基于分层PCE的节点并行资源预留跨域路径建路方案的性能，使用离散事件仿真工具OMNet++搭建了仿真环境，

与 SD-PCE、pH-PCE 算法进行对比。

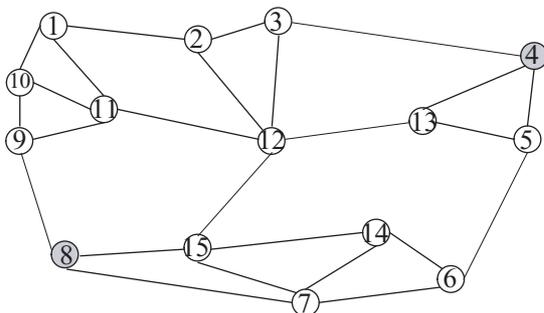
SD-PCE 方法基本思想是：首先，由父 PCE 计算出跨域路径经过的域序列；然后，使用 BRPC 机制计算不相交跨域路径；最后，由源节点开始使用 RSVP-TE 协议进行前向或后向资源预留。

pH-PCE 方法基本思想是：首先，父 PCE 利用边界节点构成的虚拓扑计算出一条或多条由源节点、目的节点和边界节点组成的虚路径；然后，利用子 PCE 计算各个域内虚路径段对应的物理路径及链路资源，将结果发给父 PCE；最后，父 PCE 计算出最短路径，请求子 PCE 进行资源预留，子 PCE 将资源预留请求信息发给域内路径段的头节点，进行前向或后向资源预留。

仿真网络如图 7 所示由 8 个子域组成，每个子域有 15 个节点。PCE 采用外置方式与某个节点连接。每条链路包含两条单向光纤，每条光纤中有 16 个可用波长，每条光纤时延为 0.4ms，OXC 波长配置时间为 10ms。每个节点向其他域随机节点发送 500 个业务请求，业务请求间隔为  $\lambda$ ，业务持续时间为  $\mu$ 。网络的业务量可表示为业务的平均持续时间与业务请求间隔之比。



(a) 域间网络



(b) 域内网络

图 7 仿真网络

图 8 是当业务持续时间  $\mu=1.0s$  时，网络负载与建路时延的仿真结果。从图中可以看出，随着网

络负载的增加，整体平均建路时延减小，SD-PCE 时延减小幅度较大，在不同的网络负载下 HPCE-PNC 方法的建路时延要比 pH-PCE 方法的建路时延少约 30ms。

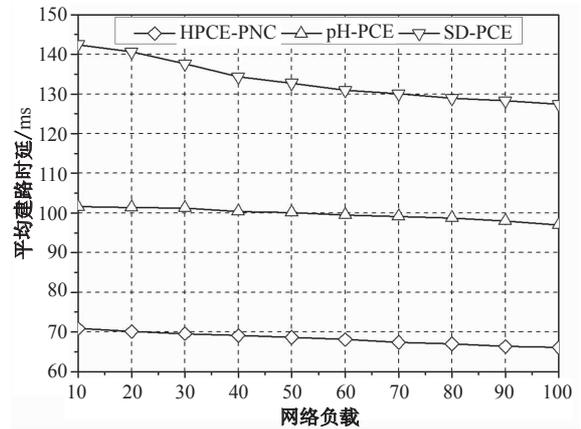


图 8 平均建路时延

SD-PCE 采用节点顺序资源预留方式，资源预留时延等于路径上所有节点资源预留时间之和，建路时延最长；pH-PCE 方法采用域间并行资源预留，资源预留时间等于时延最长的一个子域内节点资源预留时延之和，建路时延次之；本文 HPCE-PNC 通过节点并行预留资源，资源预留时延等于时延最长的一个节点的预留时延，建路时延最短。

建路成功率定义为成功建立路由的次数与路由建立请求的总次数之比。图 9 是当业务持续时间  $\mu=1.0s$  时，网络负载与建路成功率的仿真结果。随着网络负载的增加，pH-PCE、SD-PCE 和 HPCE-PNC 3 种方法的建路成功率都逐渐减小，但基于 HPCE-PNC 方法的建路成功率要高于 pH-

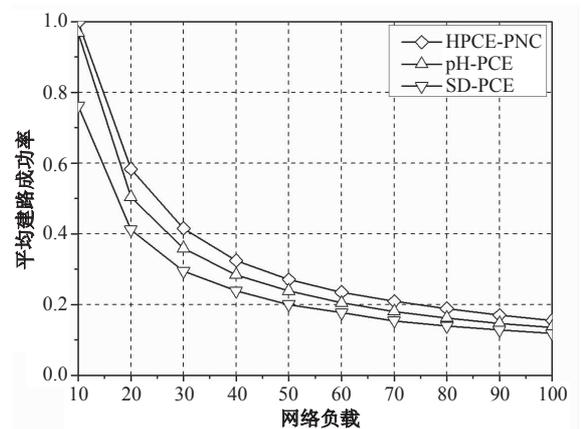


图 9 平均建路成功率

PCE方法的建路成功率。

SD-PCE采用前向资源预留或后向资源预留方式,在预留过程中会出现先波长资源冲突,造成业务阻塞严重。而pH-PCE和HPCE-PNC的阻塞主要由建路时延造成,业务阻塞较小。

#### 4 结束语

针对复杂大电网通信网的多域特性,通过对分层PCE算路策略的分析,提出了一种基于分层PCE的节点并行资源预留跨域保护路径建路方案(HPCE-PNC)。该方法使用分层PCE计算出一个代价最小的不相交路径对,并对路径对进行资源分配,实现了跨域保护路径的快速建立。仿真证明了该方法具有较高的建路成功率和较短的建路时延。

通过分层PCE的构架及路径建立机制在电力通信网中的应用,在业务层面,提供区分可靠性的灵活的点到多点、多点到多点业务路由;在网络层面,可以降低路由器的算路压力,提高通信网资源利用率,降低网络的维护成本,提高网络的可拓展性。

#### 参 考 文 献

- [1] 曹惠彬. 国家电网公司“十二五”通信网规划综述[J]. 电力系统通信, 2011, 32(223): 1-6.
- [2] Farrel A, Vasseur J P, Ash J. A path computation element (PCE)-based architecture [R]. RFC4655, August, 2006.
- [3] Vasseur J, Ayyangar A, Zhang R. A per-domain path computation method for establishing inter-domain traffic engineering (TE) label switched paths (LSPs) [R]. RFC5152, February, 2008.
- [4] Vasseur J P, Zhang R, Bitar N, et al. A backward-

recursive PCE-based computation (BRPC) procedure to compute shortest constrained inter-domain traffic engineering label switched paths [R]. RFC5441, April, 2009.

- [5] King D, Farrel A. The Application of the Path Computation Element Architecture to the Determination of a Sequence of Domains in MPLS and GMPLS [R]. RFC6805, November, 2012.
- [6] Casellas R, Lee Y. PCEP extension for WSON routing and wavelength assignment. draft-lee-pce-wson-rwa-ext-05.txt, February, 2013.
- [7] Vasseur J P, Roux J L. Path computation element (PCE) communication protocol (PCEP) [R]. RFC 5440, March, 2009.
- [8] Takeda T, Oki E, Shiimoto K. Diverse path setup schemes in multi-domain optical networks [C] // Broadband Communications, Networks and Systems, 2008. BROADNETS 2008. 5th International Conference on. IEEE, 2008: 523-530.
- [9] W Zongwei, P Yunfeng, W Yin. PCE based parallel resource reservation scheme for inter-domain path in optical network [C] // Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2011.

收稿日期: 2013-06-04

作者简介:

吴润泽(1975—),女,博士,副教授,研究方向为宽带通信网络技术及其在电力系统中的应用, E-mail: wurz@ncepu.edu.cn;

吕文涛(1988—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统通信中网络的生存性保护机制, E-mail: lvwentao0118@126.com;

唐良瑞(1966—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统通信、信息安全、无线通信等。

(责任编辑: 杨秋霞)