

# 基于 Bellman-Ford 算法的配电网节能控制研究<sup>\*</sup>

李邦云

(国网成都供电公司 成都 610016)

**摘 要** 为解决大量分布基于改进最小费用路算法的电源并网场景下的主动配电网节能控制优化问题,通过建立与配电网相应的图论模型,将潮流管理问题转化为寻求图论模型最小费用流的问题。鉴于传统最小费用路算法具有结构复杂、计算繁琐等缺点,论文提出了一种基于 Bellman-Ford 算法改进的最小费用流计算,该算法采用容量修改方式取代传统算法中的流量修改方式,大大简化了寻找图论模型中最小费用流的计算。应用 Matlab 建立仿真模型并进行仿真,仿真结果表明,改进的最小费用流 Bellman-Ford 算法应用于主动配电网潮流管理能够实现潮流优化,可以有效解决分布式电源(DG)并网造成的潮流阻塞问题,最终达到配电网节能控制的目的。

**关键词** 分布式电源;主动配电网;最小费用流;Bellman-Ford 算法;节能控制;潮流优化

**中图分类号** TM761

**DOI:**10. 3969/j. issn. 1672-9730. 2018. 08. 009

## Research on Energy Conservation Control Based on Bellman-Ford Algorithm

LI Bangyun

(State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610016)

**Abstract** In order to solve the optimization problem of energy-saving control of active distribution network with large number of distribution based on the improved least-cost routing algorithm and by establishing the graph theory model corresponding to the distribution network, the problem of power flow management is transformed into seeking the minimum cost of the graph theory model Flow problem. In view of the shortcomings of the traditional minimum cost routing algorithm, such as complicated structure and complicated calculation, this paper proposes an improved minimum cost flow calculation based on the Bellman-Ford algorithm, which uses the capacity modification method to replace the traffic modification method in the traditional algorithm, which greatly simplifies finding the least cost flow in graph theory model. The simulation model is established by Matlab and the simulation results show that the improved minimum cost flow Bellman-Ford algorithm can be used to optimize the power flow and can effectively solve the power flow congestion caused by distributed power grid (DG) problems, and ultimately achieve the purpose of distribution network energy saving control.

**Key Words** distributed power supply, active distribution network, minimum cost path, bellman-ford algorithm, energy conservation control, tide optimization

**Class Number** TM761

## 1 引言

随着传统能源的逐渐枯竭,以可再生能源为主的分布式电源(Distributed Generation, DG)技术得到了快速的发展<sup>[1-3]</sup>。由于分布式电源具有随机性和不可预测性的特点,将会改变配电网的电压、提高电网的短路容量、增加继电保护复杂度、影响网

络可靠供电以及致使电能质量的恶化<sup>[4]</sup>。针对这一现状,学者们提出了主动配电网技术<sup>[5]</sup>。主动配电网中分布式发电单元、储能单元、微网单元都是可控的<sup>[6]</sup>,通过灵活的网络拓扑结构来管理潮流,对局部的 DG 进行主动控制和主动管理。

为了优化主动配电网的潮流管理并最终达到节能控制的目的,构建主动配电网的图论模型,将

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018年2月10日,修回日期:2018年3月15日

作者简介:李邦云,男,硕士,高级工程师,研究方向:配电网节能。

潮流管理问题转化为在图论模型中寻找最小费用流问题。文献[7]提出了遗传算法求解带容量限制的最小费用流问题,并研究了带容量限制的固定费用和可变费用的最小费用流问题,结合最优解的结构特点为之设计了遗传算法,验证了该算法具有很好的近似比和很快的收敛速度。文献[8]指出计算最小费用最大流问题存在负回路算法、最小费用路算法、原始一对偶算法三个基本的算法,在用负回路算法计算最小费用最大流时,需要验证是否存在负回路,计算量比较大,用最小费用路算法计算最小费用最大流问题时,需要每次找到最小费用流。文献[9]对最小费用路算法进行改进,提出一种求解最小费用流的新方法,该算法先找出图形中所有增广链,按增广链的单位费用大小排序,先对最小费用增广链增流。该算法结构简单,相对传统最小费用路算法,避免了反复构造增量网络。

本文介绍了计算最小费用流的传统算法,建立了主动配电网图论模型,在传统最小费用路算法的基础上,提出基于 Bellman-Ford 算法<sup>[10]</sup>改进的最小费用流计算,相对于传统算法,该算法简化了求最小费用流的过程。建立了配电网 Matlab 仿真模型,仿真结果证明该算法可以节省配电费用并有能效解决大量 DG 接入配电网引起的潮流阻塞问题,并可对配电网节能达到有效的控制。

## 2 建立主动配电网的图论模型

主动配电网潮流优化的目标是对分布式电源进行经济调度,使从发电区域到负荷区域的输配电总费用最小化、输电能力最大化,这与运筹学中的最小费用流问题吻合<sup>[11]</sup>。最小费用流问题的思想就是<sup>[12]</sup>:流量从源点到汇点,经过合理地选择路径、分配经由路径的流量,使在保证获取最大流量的同时花费最小。

图 1 是一个示例配电网,表 1 和表 2 是配电网的相关参数,其中区域  $i$  中负载的用电费用系数用  $\gamma_i$  表示,区域  $i$  的最大可发电功率用  $P_{Gi}^{\max}$  表示,区域  $i$  的发电费用系数用  $\alpha_i$  表示,区域  $i$  的负荷大小用  $P_{Li}$  表示,区域  $i$  的负荷损耗费用用  $\gamma_i$  表示,区域  $i$  与区域  $j$  之间的输电费用系数用  $\beta_{ij}$  表示,区域  $i$  与区域  $j$  之间输电线路的最大可传输功率用  $P_{Tij}^{\max}$  表示。

配电网实际运行总费用为

$$f=\sum \alpha_i P_{Gi}^{\max}+\sum \beta_{ij} P_{Tij}^{\max}+\sum \gamma_i P_{Li} \quad (1)$$

主动配电网的潮流是可以双向流动的,建立一

个有向图如图 2,图 2 中源点  $S$  和汇点  $T$  表示各区域电网的电源和负荷。用有向图中边的长度表示费用系数,其容量即输电线路的额定容量或区域最大发电功率及负荷功率。图 2 中括号内左边数字表示容量限制,右边数字表示费用系数。

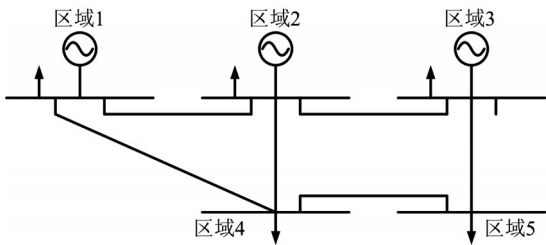


图 1 示例配电网

表 1 各区域参数

参数	区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5
$\gamma_i$	1	1	1	2	2
$P_{Gi}^{\max}$ (MV)	15	10	18	0	0
$\alpha_i$	7	2	3	0	0
$P_{Li}$ (MV)	5	10	10	5	5

表 2 区域间参数

参数	T12	T23	T14	T24	T35	T45
$\beta_{ij}$	7	5	5	5	8	5
$P_{Tij}^{\max}$ (MV)	1	2	3	1	1	2

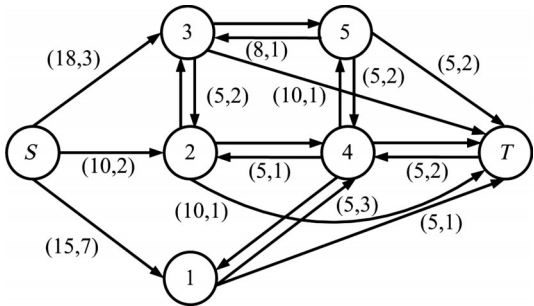


图 2 配电网图论模型

## 3 传统算法计算最小费用流

最小费用路算法<sup>[13]</sup>,是以零流作为网络的初始流,然后找出源点  $v_s$  到汇点  $v_t$  的最小费用增广链并沿其增广得到一个流量最大且费用最小的新流,重复该过程直至获得流值等于目标流值  $v_0$  的费用最小的流或不存在从  $v_s$  到  $v_t$  的路,所求得的流即为最小费用流。

最小费用路算法如下:

Step1: 选定初始流为零流;

Step2: 判定当前流  $f$  (记作  $v_{alf}$ ) 与目标流值是否相等,若  $v_{alf}=v_0$ ,则当前流就是最小费用流,算法结束;若  $v_{alf}\neq v_0$ ,执行 Step3;

Step3: 构造配电网的增广网络  $G(f)$ ,若

$G(f)$  中没有从  $v_s$  到  $v_t$  的有向路径,则说明配电网网络  $G$  中无流量值为  $v_0$  的可行流,算法结束;若  $G(f)$  存在  $v_s$  到  $v_t$  的有向路径,则选其中一条最短路径  $P$ ,执行 Step4;

Step4: 路径  $P$  上弧  $a_{ij}$  的容量记为  $c_{ij}$ , 令  $\Delta f = \min\{c_{ij}, v_0 - \text{val}f\}$ ,  $(i, j) \in A$  沿  $P$  对当前流增流  $\Delta f$  得到新流  $f$ , 执行 Step 2。

传统算法计算最小费用流有如下缺点:

1)最小费用路算法每次对模型进行增流时都需要构造一次增量网络<sup>[14]</sup>。主动配电网规模大结构复杂,用最小费用路算法计算最小费用流时需要多次构造增量网络,计算异常复杂。

2)最小费用路算法每次构造增量网络会找到所有从源点到汇点增广链,但每次都只用了一条从源点到汇点的增广链。下一轮重新构造增广网络找到的最小费用增广链也一定存在于上一轮找到的未被利用的增广链中,增广链没有得到充分利用。

## 4 求最小费用流的改进 Bellman-Ford 算法

### 4.1 改进算法引入

基于 Bellman-Ford 算法<sup>[15]</sup>改进最小费用流计算的中心思想是,对于图论模型,先找到最小费用路,按照该条路上的容量限制,将该路上的流量设计得尽可能大。找到该路后,对该模型进行容量的修改,而非流量的修改,这样每一次修改,图论模型中必有边的容量修改成 0。第二次寻找最小有费用路时不考虑容量为 0 的边。第二次找到的最小费用路的单位费用肯定比第一次费用大,同理,依次找到的最小费用有向路的单位费用是递增的,这样,在模型中依次安排流量,最终费用肯定是最小的。

改进算法计算步骤如下:

Step1:取零流作为图论模型初始的可行流;

Step2:先忽略网络中容量限制,仅考虑费用系数,令源点  $v_s$  的标记  $d(v_s)=0$ ,对于点  $v_j \neq v_s$ ,则令  $d(v_j)=\infty$ ,  $Q=\{v_j\}$ ,  $i \neq s$ ;

Step3: 对  $\forall v_j \in \bar{Q} = V - Q$ , 若有  $(i, j)$  使  $d(v_j) > d(v_i) + w_{ij}$ , 则令  $d(v_j) = d(v_i) + w_{ij}$ ,  $h_i = i$ ; 否则保持  $d(v_j)$  不变,即令  $d(v_j) = \min\{d(v_j), d(v_i) + w_{ij}\}$ ;

Step4: 取  $v \in \bar{Q}$  使得  $d(v) = \min\{d(v_i)\}$ ,  $(v_i \in \bar{Q})$ ; 若  $v = v_t$ , 转 Step5; 否则,记  $v_i = w$ , 另  $Q = Q \cup \{v_i\}$ , 转 Step3;

Step5:按  $h_j$  进行反向追溯即可得到从源点到汇点费用最小的路记为  $P$ ;若存在  $P$  则转下步,若不存在  $P$  转 Step6;

Step6: 令  $\Delta f = \min r_{ij}$ ,  $(i, j) \in P$  在  $G$  中沿  $P$  对  $f$  增流  $\Delta f$ , 增流后新流记为  $f' = f + \Delta f$ , 并对网络中各边容量进行修改  $G'_{ij} = G_{ij} + \Delta f$ , 若边的容量为 0, 将该边删除在求解最短问题时不再考虑该边,转步骤 2。

Step7:算法结束,当前  $f$  即为最小费用最大流。

### 4.2 应用改进算法算例分析

对图 2 所示配电网的图论模型用改进算法求最小费用流,改进算法以  $f=0$  开始,令  $d_s=0$ ,其余节点标号为  $\infty$ ,再对节点 1, 2, 3 标号  $d_1=7$ ,  $d_2=2$ ,  $d_3=3$ ,  $h_1=h_2=h_3=S$ ,如图 3 所示。

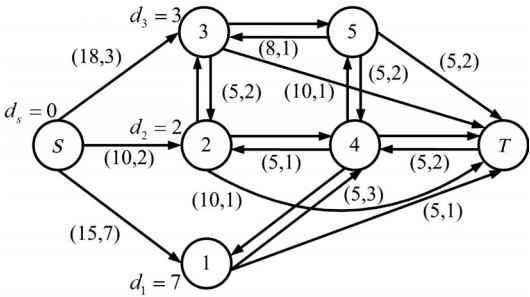


图 3 算例第一轮标号

因为  $d_2$  最小,以节点 2 为起点继续标号,由  $d_1 > d_2 + a_{21}$ , 知  $d_1 = d_2 + a_{21} = 3$ ,  $h_1 = 2$ , 同理可求出  $d_t = 3$ ,  $h_t = 2$ ,  $d_4 = 3$ ,  $h_4 = 2$ ;  $d(v_i) = \min\{d(v_j)\}$  ( $v_j \in \bar{Q}$ ) 故知  $d_t$  已经达到最小,故示例网络最短路径为  $S-2-T$ , 这就是当前网络的最小费用增广链,在图 4 中用粗线表示。

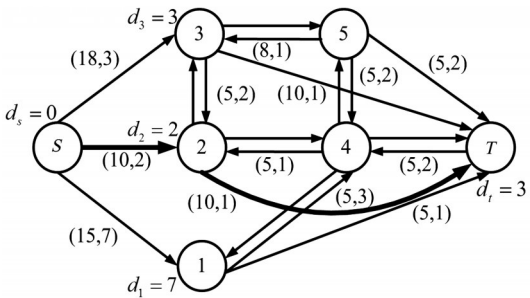


图 4 确定最小费用增广链



得到的最短路径  $S-2-T$  后则沿该路对  $f$  进行增流,增流后网络如图 5 所示。

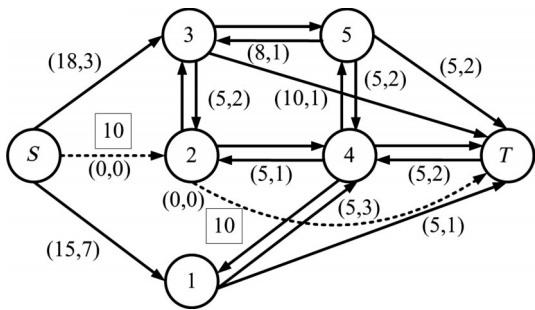


图 5 第一次对增广链进行增流后的网络

图 5 中,沿路  $S-2-T$  对  $f$  增流  $\Delta f=10$  并对该路上各边的容量进行修改,第二轮计算最短路时不再考虑这两个边,在图 5 中用虚线表示,图 5 中各边方框内的数字表示当前网络中的流,没有方框的线表示流量为零。由于下面的搜索过程和上面一致是重复递归的过程,因此省略。算法终止时就可以得出该配电网图论模型的最小费用最大流。

### 4.3 基于 Bellman-Ford 算法改进相对传统算法的优点

基于 Bellman-Ford 算法改进相对于传统算法有如下优点:

- 1)改进算法只找了一条从源点到汇点的有向路就是最小费用有向路,因此不存在传统算法中每个增量网络找出了所有增广链,却只应用了一条增广链的问题,简化了计算过程。
- 2)改进算法每一次找到最小费用路后对图论模型的容量而非流量进行修改,这样,每进行一次修改,至少有一条边的容量变为 0。下一次寻找最小费用有向路时,不必再考虑容量为 0 的边,由示例配电网图论模型可知,每进行一次修改,图论模型就会得到简化,降低了下一轮求源点到汇点最小费用有向路计算的复杂度。

## 5 仿真验证

在 Matlab 中编程并在 Simulink 中搭建主动配电网仿真模型,该模型各区域等效为一个电源、一个负载和一个统一潮流控制器 UPFC。网络中各区域参数如表 1 所示。

对主动配电网未采用优化算法控制和采用了优化算法控制在正常运行和发电费用改变两种情况下进行了仿真和对比分析,同时验证了优化算法对潮流阻塞问题的解决能力。通过各区域之间有功功率的交互变化和运行费用的减少来反映最小

费用流优化控制策略的控制效果。

### 5.1 仿真结果

1)未采用 Bellman-Ford 算法进行潮流管理时,统一潮流控制器使区域 1、2、3 的输出功率分别为 14MW、8MW、13MW,得到各区域之间的功率流动如图 6 所示。

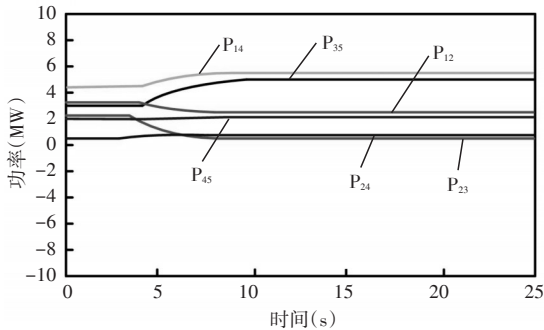


图 6 未采用 Bellman-Ford 算法时各区域之间功率流动

2)采用 Bellman-Ford 算法进行潮流管理时,区域 1、2、3 输出功率主动调整为 7MW、10MW、18MW。各区域间的功率流值  $f_{ij}$  分别为:  $f_{12}=2$ ;  $f_{23}=3$ ;  $f_{14}=5$ ;  $f_{24}=5$ ,各区域间功率流动如图 7 所示。

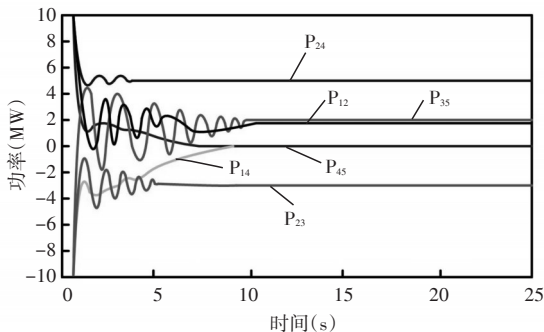


图 7 采用了 Bellman-Ford 算法时各区域之间功率流动

3)主动配电网中分布式电源种类多样化和投切数量不确定性使得发电成本经常变化,为了验证改进算法对发电成本改变问题的处理能力,设区域 1、2、3 的发电费用系数由表 1 中的 7、2、3 变为 3、4、5。若不进行潮流优化,各区域间功率流动与情况 1)完全相同,发电费用改变后的网络运行费用为 171.6p.u.。应用改进算法进行潮流优化后,区域 1、2、3 输出功率主动调整为 10MW、10MW、15MW,各区间功率流动如图 8 所示。

4)潮流阻塞是配电网馈电线路中的潮流发生变化而超出馈电线路容量限制而发生的现象。随着分布式电源大规模接入电网,潮流阻塞问题日益突显,为了验证改进算法对潮流阻塞问题的处理能力,假设在情况 2)的基础上,区域 3 到区域 5 的馈电线路容量由 8MW 减少到 3MW,这样区域间的传

输功率就超过线路容量 2MW,从而引起潮流阻塞。经过改进最小费用路算法对配电网潮流优化后,发电区域输出功率与情况 2)相同,输出值仍为 7MW、10MW、18MW,但区域间的功率流值  $f_{ij}$  发生改变,  $f_{14}=2$ ;  $f_{24}=5$ ;  $f_{23}=4$ ;  $f_{35}=3$ ;  $f_{45}=2$ ,如图 9 所示。

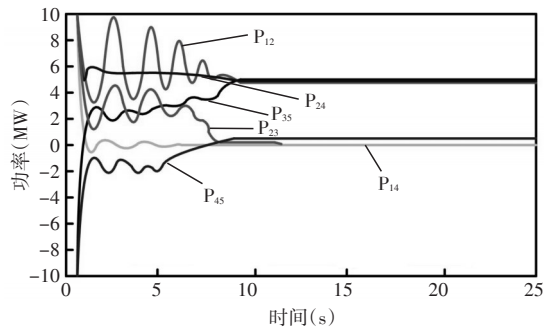


图 8 发电系数用改变

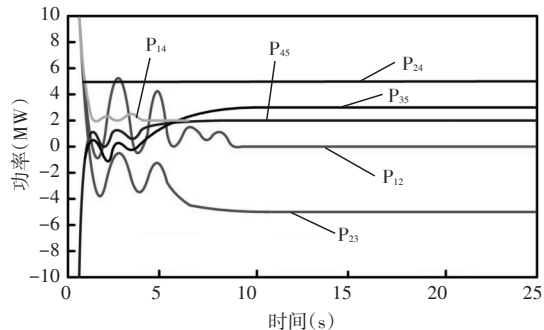


图 9 潮流阻塞情况

5.2 仿真结果分析

由仿真结果 1),根据目标函数可计算出未采用改进 Bellman-Ford 算法时,其网络运行费用为 185.6p.u..由仿真结果 2),可求出网络运行费用为 151p.u.,由此可知,采用改进 Bellman-Ford 算法后可节省费用 18.6%。由仿真结果 3)可计算出,采用改进 Bellman-Ford 算法后,费用为 160.8p.u.,相比未采用该算法,节省了费用 10.8p.u.,验证了改进 Bellman-Ford 算法在发电费用系数改变时同样能优化潮流。由仿真结果 4)知,用改进 Bellman-Ford 算法潮流管理,使各区域间的功率流动较情况 2)发生了改变,验证了该算法能有效解决潮流阻塞问题。

6 结语

本文从图论的角度分析了主动配电网潮流优化问题,建立了配电网的图论模型,提出了基于 Bellman-Ford 算法改进的最小费用路计算,并用该算法对配电网潮流进行优化。在 Matlab 中搭建了

配电网模型并进行仿真验证,仿真结果表明,该算法能够大幅度节省配电网输电费用,并能够有效解决潮流阻塞问题。

参考文献

[1] 付学谦,陈皓勇,刘国特,等. 分布式电源电能质量综合评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4270-4276.

[2] 刘柏良,黄学良,李军,等. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 450-456.

[3] 吴万禄,韦钢,谢丽蓉,等. 含分布式电源与充电站的配电网协调规划[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 65-73.

[4] 杨珮鑫,张沛超. 分布式电源并网保护研究综述[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1888-1895.

[5] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 10-16.

[6] 王成山,孙充勃,李鹏. 主动配电网优化技术研究现状及展望[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 8-15.

[7] Xie F, Jia R. Nonlinear fixed charge transportation problem by minimum cost flow-based genetic algorithm[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63(4): 763-778.

[8] Filip L D, Pintilie L. Metal-ferroelectric-metal current-voltage characteristics: A charge flow balance through interfaces approach[J]. The European Physical Journal B, 2016, 89(2): 44-47.

[9] Wang J, Leng J, Liu J, et al. Engineered Directional Charge Flow in Mixed Two-Dimensional Perovskites Enabled by Facile Cation-Exchange[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2017, 121(39): 21281-21289.

[10] 韩伟一. 经典 Bellman-Ford 算法的改进及其实验评估[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(7): 74-77.

[11] 纪亚劲,刘艳清,赵礼峰. 求解最小费用流的一种新算法[J]. 计算机技术与发展, 2017(12): 1-6.

[12] 刘龙城,李超,崔佳. 容量型最小费用流逆问题的可行性研究[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56(6): 882-885.

[13] 赵礼峰,陶晓莉. 最小费用最大流问题的一种新算法[J]. 计算机技术与发展, 2014, 24(1): 130-132.

[14] 丁三军,陶兴宇,石祥超,等. 增量网络监测点的增量选取算法[J]. 计算机应用, 2015, 35(12): 3344-3347.

[15] 韩伟一. 基于固定序的 Bellman-Ford 算法的改进[J]. 运筹与管理, 2015, 24(4): 111-115.