

# 密集飞蜂窝网中基于博弈论的最佳功率分配法

李亚玲

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

**摘要:**研究了异构蜂窝网在同频组网方式下飞蜂窝网用户(FUEs)上行传输功率分配方案。为了保证宏蜂窝的服务质量,控制所有FUEs对宏基站(MBS)的总干扰不超过预先设定的干扰门限 $Q$ 。将MBS的资源分配问题建立为一个博弈问题,采用干扰智能定价机制,并提出内罚函数法通过迭代算法求最佳干扰价格。在飞蜂窝网用户功率控制问题上,采用一种更加实际的场景,即FUE不知道其他FUE发送功率信息,并提出并行迭代功率控制算法。该算法可以保证收敛于纳什均衡点(NE),即各个FUEs可以获得最佳功率分配。通过仿真可看到,并行迭代功率分配算法会收敛于最佳发送功率,内罚函数法也会收敛于最佳干扰价格。该方案可有效控制MBS频谱资源分配以及FUEs对MBS的干扰,从而确保宏蜂窝网用户的传输性能。

**关键词:**飞蜂窝;智能定价;功率分配;博弈论;内罚函数法;纳什均衡点

**中图分类号:**TP301

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2016)10-0169-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.10.037

## Optimal Power Allocation Strategy Based on Stackelberg Game Approach in Dense Femtocell Networks

LI Ya-ling

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

**Abstract:** The uplink transmission power allocation strategy of Femtocell User Equipments (FUEs) in heterogeneous cellular networks is studied, in which a central macrocell is underlaid with some femtocells, all operating over the same frequency band. In order to ensure the service quality of the macrocell, the total interference of all FUEs to Microcell Base Station (MBS) is kept below an interference power constraint  $Q$ . In this paper, the resource allocation problem of MBS is modeled as a Stackelberg game, and interference smart pricing scheme and present interior penalty function method is adopted, obtaining optimal interference price by iterating algorithm. In order to solve the power allocation problem of FUEs, a more realistic case is considered in which FUEs do not know others strategy, and a parallel iterative power update algorithm is used. It can be guaranteed to converge to the Nash Equilibrium (NE), that is each FUEs gets optimal power allocation. Simulation shows that parallel iterative power update algorithm can converge to the optimal transmit power and interior penalty function method can converge to the optimal interference price. This strategy can effectively control the spectrum resource allocation of MBS and interference of FUEs to MBS, ensuring the transmission performance of macrocell users.

**Key words:** femtocell; smart pricing; power allocation; Stackelberg game; interior penalty function method; Nash equilibrium

### 1 概述

随着无线互联网的快速发展,以及新兴业务和移动应用的广泛普及<sup>[1]</sup>,移动用户对数据速率有了更高要求<sup>[2]</sup>。无线网络必须不断提高通信能力,一个有效方法是在宏基站覆盖的范围内引入基于蜂窝通信制式的飞蜂窝基站<sup>[3]</sup>,加强特定地区网络覆盖率,形成两层异构蜂窝网<sup>[4]</sup>。飞蜂窝网可以有效提高室内网络覆盖

率,并增加室内用户传输数据速率,从而使得室内用户得到较高质量的无线数据服务。飞蜂窝网与宏蜂窝网共享同一频段,使得异构蜂窝网中频谱资源得到有效利用。并且飞蜂窝基站承担了宏基站部分负载<sup>[5]</sup>,宏蜂窝用户可获得更高数据速率和更高质量的通信服务。

5G 蜂窝网即将到来,小蜂窝网已经成为主流技

收稿日期:2015-12-14

修回日期:2016-04-08

网络出版时间:2016-08-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271234)

作者简介:李亚玲(1990-),女,硕士研究生,研究方向为无线数据与移动计算。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160823.1359.062.html>

术<sup>[6]</sup>。小蜂窝网包含多种类型的基站,主要有增强室内网络覆盖的飞蜂窝网基站和改善室外网络性能的微蜂窝基站<sup>[7]</sup>。然而成功部署小蜂窝网还面临着资源分配、干扰抑制等挑战,如何找出一个有效方法控制 FUEs 传输功率以保证 MBS 受到 FUEs 的总干扰低于 MBS 干扰门限,是一个值得研究的问题。

文中在两层飞蜂窝网中提出了新的功率分配方法,MBS 引入智能定价机制,MBS 向 FUEs 出售干扰配额,并通过控制干扰价格  $u$  来最大化其收益值,边界条件为所有 FUEs 的干扰总和不超过 MBS 干扰门限  $Q$ 。将该资源分配问题建模成一个凸优化问题,为解决该问题,在 MBS 和 FUEs 之间建立斯坦伯格博弈<sup>[8]</sup>。其中,MBS 为博弈领导者,FUEs 为博弈从属者。FUEs 效用是它传输数据增益减去购买干扰配额支出,用户端各 FUEs 竞争有限频谱资源,形成非协作子博弈。文中利用内罚函数法求最佳干扰价格,在 FUEs 功率控制问题上,采用一种更加实际的场景,即飞蜂窝网用户不需要知道其他蜂窝网用户发送功率的信息。文中提出并行迭代功率控制算法,该算法可以保证收敛于纳什均衡点(NE),即各个 FUEs 可以获得最佳功率分配。

## 2 系统模型和问题建立

在两层蜂窝网中,MBS 位于中心区域, $N$  个飞蜂窝网随机地部署在一个 MBS 的覆盖区域  $R$  内。飞蜂窝网覆盖范围内的用户设备由给定飞蜂窝网基站(FBS)提供服务。由于频谱资源的稀缺,在两层网络中假设 FBSs 和 MBS 采用相同的频谱资源<sup>[9]</sup>。

用户  $i$  与 FBS ( $n \in N$ ) 之间信道功率增益表示为  $h_{n,i}$ ,用户  $i$  与 MBS 之间信道功率增益可表示为  $g_i$ 。FBS 覆盖范围内,在每个时隙内只有一个预定活跃用户传输数据到它的 FBS。图 1 是一种系统模型,假定信道功率增益为独立同分布随机变量,接收端背景噪声为独立循环复高斯向量,其均值为 0,方差为  $\sigma^2$ 。由于不同飞蜂窝网之间距离很短,故存在相互干扰。

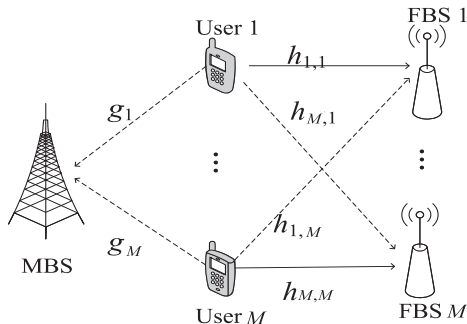


图 1 由单一 MBS 和多个 FBSs 组成的

异构蜂窝网上行传输模式

为了保证服务质量,假设 MBS 可以容忍的最大干

扰门限为  $Q$ ,即 MBS 接收到来自 FUEs 干扰总和不能大于  $Q$ ,  $\sum_{i=1}^M I_i(p_i) \leq Q$  (注: $M$  为飞蜂窝网用户数目)。其中, $I_i(P_i)$  为 MBS 处收到用户  $i$  对它的干扰,用户  $i$  的传输功率为  $P_i$ 。在该研究模型中,用户  $i$  以发送功率  $P_i$  向它专属 FBS 发送数据。需要分析确定 FUEs 最佳发送功率和 MBS 最佳干扰价格。由于 FUE 发送功率依赖于 MBS 干扰价格和其他 FUE 发送功率值,使用博弈论<sup>[10]</sup>法研究该问题。

## 3 最佳发送功率和最佳干扰价格

宏蜂窝的目标是最大化效用的同时满足所有 FUEs 对其干扰总和低于干扰门限  $Q$ ,可以表示为如下的优化函数:

$$\max U_{\text{MBS}}(u, p) = \max \sum_{i=1}^M u I_i(p_i) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^M I_i(p_i) \leq Q$$

飞蜂窝网用户端,用户  $i$  效用函数可表示为:

$$U_i(p_i, P_{-i}, u) = \max \{ \lambda_i \log(1 + \frac{p_i h_{i,i}}{\sum_{j \neq i} p_j h_{i,j} + \sigma^2}) - u g_i p_i, 0 \} \quad (2)$$

其中, $\lambda_i$  为飞蜂窝网用户  $i$  单位传输速率增益。假设  $\lambda_i = 1, \forall i$ ,  $\sum_{j \neq i} p_j h_{i,j}$  为其他 FUEs 对飞蜂窝网用户  $i$  造成的干扰。用户  $i$  从 MBS 处购买干扰配额为  $I_i(p_i) = g_i p_i$ ,单位干扰配额价格为  $u$ 。每个飞蜂窝网用户需要找出最佳发送功率来最大化其效用函数,MBS 需找出最佳干扰价格来最大化其效用函数。

为了获得各自最大的效用,MBS 与飞蜂窝网用户形成博弈,多个飞蜂窝网用户竞争有限干扰配额资源,由于利益冲突形成非协作子博弈<sup>[11]</sup>。对于给定干扰价格  $u$ ,首先解决非协作子博弈,找出 NE,即飞蜂窝网用户最佳发射功率  $p_i^*$ ,并将  $p_i^*$  代入 MBS 与用户端之间博弈中,找出最佳干扰价格  $u^*$ ,如此循环往复,直至系统达到最优。

用户端效用问题为凸优化问题,其最优解需满足 KKT 条件<sup>[12]</sup>。通过求 KKT 条件找到最佳发射功率  $p_i^*$  为:

$$p_i^* = \max \{ (\frac{\lambda_i}{u g_i} - \frac{\sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j} + \sigma^2}{h_{i,i}}), 0 \}, \forall i \quad (3)$$

其中,飞蜂窝网用户  $i$  只有满足

$$\frac{\lambda_i h_{i,i}}{g_i (\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j})} > u, \text{ 才会参与宏基站频谱共享。}$$

设有  $M$  个飞蜂窝网用户参与频谱共享,用户  $i$  并行迭代功率分配为:

$$p_i^* = \left( \frac{\lambda_i}{ug_i} - \frac{\sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j} + \sigma^2}{h_{i,i}} \right), i \in M \quad (4)$$

等式左右两边同乘  $h_{i,i}$ , 得到  $h_{i,i}p_i^* + \sum_{j \neq i} h_{i,j}p_j^* =$

$\frac{\lambda_i h_{i,i}}{ug_i} - \sigma^2, i \in M$ , 可写成矩阵形式:

$$\mathbf{H} \times \mathbf{P}^* = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,M} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{M,1} & h_{M,2} & \cdots & h_{M,M} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_1^* \\ p_2^* \\ \vdots \\ p_M^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda_1 h_{1,1}}{ug_1} - \sigma^2 \\ \frac{\lambda_2 h_{2,2}}{ug_2} - \sigma^2 \\ \vdots \\ \frac{\lambda_M h_{M,M}}{ug_M} - \sigma^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

矩阵  $\mathbf{H}$  各元素为信道功率增益, 均为正数且为连续分布函数。这样  $\mathbf{H}$  为满秩矩阵的概率为 1, 可得知式(5)有唯一解, 因此在飞蜂窝网用户端, 非协作子博弈有唯一纳什均衡解<sup>[13]</sup>。

飞蜂窝网用户端最佳功率响应为:

$$\mathbf{P}^* = \mathbf{H}^{-1} \mathbf{b} \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{b} = \left[ \frac{\lambda_1 h_{1,1}}{ug_1} - \sigma^2, \frac{\lambda_2 h_{2,2}}{ug_2} - \sigma^2, \dots, \right.$

$\left. \frac{\lambda_M h_{M,M}}{ug_M} - \sigma^2 \right]^T$ 。

当  $h_{i,i} > \sum_{j \neq i} h_{i,j}$ , 并行迭代功率分配算法被证明是收敛<sup>[14]</sup>的。

宏基站端宏基站最大收入函数与总干扰边界函数可表示为:

$$U_{\text{MBS}} = \max_{u \geq 0} \sum_{i=1}^M \left( \lambda_i - \frac{ug_i(\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j})}{h_{i,i}} \right) \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^M \left( \frac{\lambda_i}{u} - \frac{g_i(\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j})}{h_{i,i}} \right) \leq Q$$

上述问题可进一步转化成以下问题:

问题 1:

$$\min_{u \geq 0} \sum_{i=1}^M \frac{ug_i(\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j})}{h_{i,i}} \quad (8)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^M \left( \frac{\lambda_i}{u} - \frac{g_i(\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j})}{h_{i,i}} \right) \leq Q$$

问题 1 是一个带边界条件的凸优化问题, 可采用内罚函数法, 将带不等式边界条件的凸优化问题转换成一系列无边界条件的凸优化问题。

$f_0(u)$  表示目标函数,  $f_1(u)$  表示边界条件函数。

$$f_0(u) = \sum_{i=1}^M \frac{ug_i(\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j})}{h_{i,i}}$$

$$f_1(u) = \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{u} - \left( Q + \sum_{i=1}^M \frac{g_i(\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j})}{h_{i,i}} \right)$$

问题 2: 推广目标函数为  $f(u) = f_0(u) + r\varphi(u)$ 。其中,  $\varphi(u) = -\ln(-f_1(u))$ 。  $r > 0$  且很小, 当  $u$  靠近边界时,  $\varphi(u)$  无穷大, 即受惩罚很大, 迫使极小点落在边界条件内部, 令正数列  $\{r_k\}$  逐步减小, 原约束问题即转换成无约束问题。最终  $u$  逼近  $f_0(u)$  的约束最优解。

推广目标函数  $f(u)$  为:

$$f(u) = \sum_{i=1}^M \frac{u_i g_i(\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j})}{h_{i,i}} - r \ln \left( Q + \sum_{i=1}^M \frac{g_i(\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j})}{h_{i,i}} - \sum_{i=1}^M \frac{\lambda_i}{u_i} \right) \quad (9)$$

令  $\frac{\partial f(u)}{\partial u_i} = 0$ , 得出  $u_i(r)$  表达式。

$u(r_k) =$

$$\frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i x + \sqrt{\left( \sum_{i=1}^N \lambda_i x \right)^2 + 4(xQ + x^2)r_k \sum_{i=1}^N \lambda_i}}{2(xQ + x^2)} \quad (10)$$

其中,  $x = \sum_{i=1}^N \frac{g_i(\sigma^2 + \sum_{j \neq i} p_j^* h_{i,j})}{h_{i,i}}$ 。

内罚函数法算法步骤:

(1) 取控制误差  $\varepsilon > 0$ , 罚因子缩小系数  $0 < c < 1$ , 初始可行干扰价格  $u_1$ , 初始罚因子  $r_1$ , 令  $k = 1$ 。

(2) 以  $u_k$  为初始点解决无约束问题,  $u_{k+1} = u(r_k)$ 。

(3) 若  $r_k \varphi(u) < \varepsilon$ , 则以  $u_k$  为问题的近似最优解并结束算法, 否则令  $r_{k+1} = cr_k, k = k + 1$ , 转到步骤(2)。

内罚函数法每一次迭代都会参考各飞蜂窝网用户发送功率值来调节干扰价格, 然而各飞蜂窝网用户发送功率值是动态变化的。针对各飞蜂窝网用户功率分配问题, 文中采用并行迭代功率分配算法。飞蜂窝网用户不必知道其他用户发送功率值, 它通过预估其他飞蜂窝网用户发送功率值, 所有飞蜂窝网用户之间经过多次博弈, 达到纳什均衡状态, 此时各飞蜂窝网用户发送功率值达到最佳。程序目标为迭代循环算法均趋于收敛, 即飞蜂窝网用户发送功率收敛至最佳发送功率, 宏基站干扰价格收敛至最佳干扰价格, 系统资源分配状态会保持不变, 达到一种博弈均衡状态, 除非有条件发生改变, 博弈均衡状态会被打破, 博弈双方会再次

博弈以达到博弈均衡。

4 仿真结果分析

异构蜂窝网场景:1 个 MBS,3 个 FBS。其模拟参数分别为:  $\sigma_i^2 = \sigma^2 = 1, \lambda_i = 1, g_1 = 0.5, g_2 = 1, g_3 = 1.5, h_{1,1} = 1, h_{1,2} = 0.1, h_{1,3} = 0.2, h_{2,1} = 0.1, h_{2,2} = 1.5, h_{2,3} = 0.3, h_{3,1} = 0.2, h_{3,2} = 0.3, h_{3,3} = 2$ 。满足  $h_{i,i} > \sum_{j \neq i} h_{i,j}, i \in \{1,2,3\}$ 。如果给定干扰价格  $u = 0.5$ , 飞蜂窝网用户最佳功率响应由式 (6) 求出  $\mathbf{P}^* = [2.814\ 9\ 1.067\ 3\ 0.391\ 7]^T$ 。

图 2 表示干扰价格  $u = 0.5$  时各飞蜂窝网用户最佳功率分配。

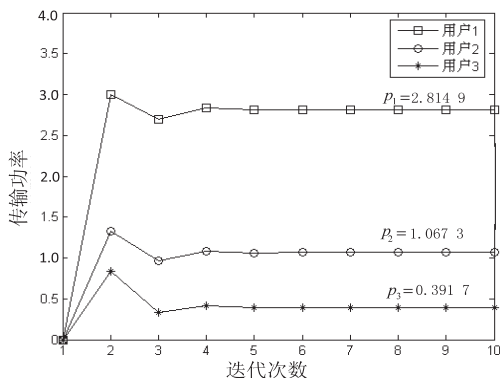


图 2 并行迭代功率分配算法收敛性能

由图 2 可看出,并行迭代功率分配算法经过几次迭代就会收敛于最佳发送功率。值得注意的是,并行迭代功率控制算法中,如果某个用户评估发射功率为负值,表示用户不会发送任何数据,即  $p_i^* = 0$ 。从图 2 还可看出,用户 1 发送功率最大,用户 3 发送功率最小,由于统一定价方案中所有飞蜂窝网用户单位干扰配额价格均相等,如果所有飞蜂窝网用户购买等量干扰配额,由于用户 1 与宏基站之间信道功率增益最小,因此它的发送功率最大。

图 3 表示宏基站干扰容限  $Q = 10$  dB 时的宏基站最佳干扰价格。

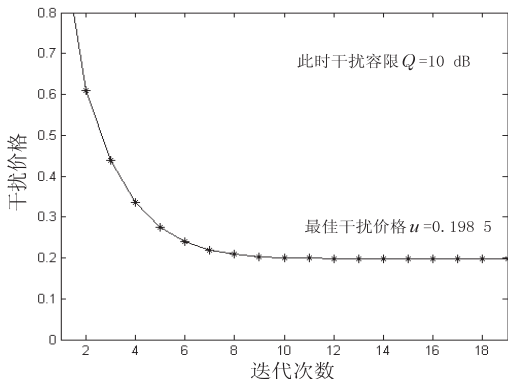


图 3 密集分布时干扰价格与内罚函数法收敛性能

由图 3 可看出,内罚函数法经过几步迭代就会收敛于最佳干扰价格,飞蜂窝基站密集分布时,可利用内罚函数法结合并行迭代功率更新算法,求得给定干扰容限下宏基站最佳干扰价格。

5 结束语

文中研究了飞蜂窝网用户密集分布时的功率分配问题,针对飞蜂窝网用户功率控制提出并行迭代功率控制算法,针对宏基站干扰价格优化提出内罚函数法。在 MBS 与 FUEs 之间建立斯坦伯格博弈模型,并在 FUEs 端提出非协作子博弈解决同层用户功率分配问题。得到了用户最佳发送功率分配最优解,在 MBS 端,采用内罚函数法,使用算法迭代可以获得干扰价格最优数值解。通过仿真可看到,并行迭代功率分配算法会收敛于最佳发送功率,MBS 干扰价格也会收敛于最佳干扰价格。文中提出基于博弈论的用户功率分配方案可有效控制宏基站频谱资源分配以及飞蜂窝网用户对宏基站的干扰,从而确保宏蜂窝网用户的传输性能。

参考文献:

[1] Ho H Y, Syu L Y. Uses and gratifications of mobile application users [C]//Proc of electronics and information engineering. [s. l.]:[s. n.], 2010:315-319.

[2] Fettweis G P. The tactile Internet: applications and challenges [J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2014, 9(1): 64-70.

[3] Chandrasekhar V, Andrews J G, Gatherer A. Femtocell networks: a survey [J]. IEEE Communications Magazine, 2008, 46(9): 59-67.

[4] Damjanovic A, Montojo J, Yongbin W, et al. A survey on 3GPP heterogeneous networks [J]. IEEE Wireless Communication, 2011, 18(3): 10-21.

[5] He S, Huang Y, Wang H, et al. Leakage-aware energy-efficient beamforming for heterogeneous multicell multiuser systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2014, 32(6): 1268-1281.

[6] Li C, Zhang J, Letaief K B. Throughput and energy efficiency analysis of small cell networks with multi-antenna base stations [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(5): 2505-2517.

[7] Ramasamy D, Ganti R, Madhow U. On the capacity of picocellular networks [C]//Proc of IEEE international symposium on information theory. [s. l.]: IEEE, 2013: 241-245.

[8] Jorswieck E A, Larsson E G, Luise M. Game theory in signal processing and communications [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2009, 26(5): 17-29.



### (8) Struts 应用程序运行。

Struts 应用程序运行需要经过以下步骤<sup>[11]</sup>: 将 Struts 目录的 lib/struts. jar 拷贝到 Web 应用的 WEB-INF/lib 目录; 将 Struts 目录的 lib/struts \*. tld 拷贝到 Web 应用的 WEB-INF 目录; 修改 Web 应用目录的 WEB-INF/web. xml 文件, 增加一个<servlet>元素来定义 controller servlet, 增加一个<servlet-mapping>元素来建立 URI 请求与 servlet 的对应关系; 修改 Web 应用目录的 WEB-INF/web. xml 文件, 使之包含 tag 库定义; 创建一个 WEB-INF/action. xml 文件来定义 Web 应用的 Action 映射关系; 在使用 Struts tag 库的 JSP 网页中加入 tag 库定义; 编译程序时, 在 CLASSPATH 中包含 struts. jar 文件。

## 5 结束语

计算机词汇属于科技词汇的范畴, 具有专业性强、概念抽象等特征<sup>[12]</sup>。随着计算机技术的快速发展, 新出现相关的英语专业词汇越来越多, 建立计算机英语词汇管理系统, 对于专业技术人员快速掌握新技术、提高开发效率等方面具有重要的现实意义。

文中基于 Struts 框架进行设计, 为开发人员提供了简单适用的解决方案。系统设计具有以下优点<sup>[13-14]</sup>: 由于 Struts 是开源软件, 能使开发者更深入地了解其内部实现机制; 实现 MVC 模式, 系统脉络更加清晰, 开发者中主要关注业务逻辑实现; 除了使用 JSP 自带的常用标记外, 还可以使用 Struts 的 Taglib 标记库, 能大大提高开发效率; 通过配置文件建立系统各部分之间的联系, 使软件系统更易于维护<sup>[15]</sup>。但也存在以下缺点: Action 用到的所有资源必须同步, 可能会引起线程安全问题; 处理 Action 时必须依赖 ServletRequest 和 ServletResponse, 摆脱不了 Servlet 容器; 处理 Action 时基于 class 和 hierarchies, 很难在 Action 处理前或后进行操作。

实际开发时要采用有灵活多变的解决方式, 充分发

挥其优势, 不断提高系统的开发效率和质量。

### 参考文献:

- [1] 赖蓉莎. 中职计算机专业英语教学改革若干思考与建议[J]. 中国职业技术教育, 2014, 22(19): 72-74.
- [2] 明巧英. 计算机专业英语个性化自主学习平台建设的思考[J]. 电子制作, 2014(14): 87-88.
- [3] 胡紫娣. 计算机英语专业词汇的构词特点[J]. 新课程研究: 中旬刊, 2013(1): 96-97.
- [4] 廖先琴. 基于 Struts 框架的 Java Web 应用开发研究[J]. 电子技术与软件工程, 2014(7): 89.
- [5] Li Y M, Wang L F. Design on framework structure of college english learning management system based on Struts2[J]. Advanced Materials Research, 2014, 846-847: 1558-1561.
- [6] Yin X, Zheng W, Zhang M, et al. A modularized operator interface framework for Tokamak based on MVC design pattern[J]. Fusion Engineering and Design, 2014, 89(5): 628-632.
- [7] Pop D P, Altar A. Designing an MVC model for rapid web application development[J]. Procedia Engineering, 2014, 69(1): 1172-1179.
- [8] 基于 MVC 模式的 Struts 框架研究与应用[EB/OL]. 2014-12-05. <http://blog.163.com/michero@126/blog/static/2825829320071013180616/>.
- [9] Brown D, Davis C M. Struts2 in action[M]. America: Manning Publications Co, 2008.
- [10] 豆丁网. Struts 配置文件 web. xml 详解[EB/OL]. 2014-12-05. <http://www.docin.com/p-3594002.html>.
- [11] 李建迎. 基于 Struts 的工矿企业客户关系管理系统设计[J]. 工矿自动化, 2013, 39(10): 9-12.
- [12] 天极网. Struts 的安装、配置与运行[EB/OL]. 2014-12-05. [http://www.yesky.com/388/1783388\\_4.shtml](http://www.yesky.com/388/1783388_4.shtml).
- [13] 王琳琳. 计算机英语中词汇缩略形式的研究[J]. 辽宁广播电视大学学报, 2013, 15(3): 82-83.
- [14] Ren Y C, Jiang D Y, Xing T, et al. Research on software development platform based on SSH framework structure[J]. Procedia Engineering, 2011, 15(1): 3078-3082.
- [15] 唐彦. 基于 Struts 框架的烟草订单管理系统研究[J]. 物流技术, 2014, 34(8): 79-82.
- [12] Kang X, Zhang R, Motani M. Price-based resource allocation for spectrum-sharing femtocell networks: A stackelberg game approach[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(3): 538-549.
- [13] Isnawati A F, Hidayat R, Sulisty S. Preliminary study: non cooperative power control game model for cognitive femtocell network[C]//Proc of IEEE international conference on ICTS. [s. l.]: IEEE, 2014: 119-124.
- [14] He G, Betz S, Debbah M. Game-theoretic deployment design of small-cell OFDM networks[C]//Proceedings of the fourth international ICST conference on performance evaluation methodologies and tools. [s. l.]: [s. n.], 2009: 1-6.

(上接第 172 页)

- [9] Jo H S, Mun C, Moon J, et al. Interference mitigation using up-link power control for two-tier femtocell networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(10): 4906-4910.
- [10] Basar T, Olsder G J. Dynamic non-cooperative game theory[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999, 19(2): 139-152.
- [11] Vilar G V, Mosquera C, Jayaweera S. Primary user enters the game: performance of dynamic spectrum leasing in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(12): 1-5.