

模拟退火算法在频率指配中的应用优化

路立伟^{1,2}, 王亮¹, 梁勇², 范荣双¹

(1. 中国测绘科学研究院 政府地理信息系统研究中心, 北京 100830;

2. 山东农业大学 信息科学与工程学院, 山东 泰安 271018)

摘 要:已知发射机坐标和可用频率,考虑同、邻频约束和人口覆盖,建立了频率指配的数学模型。即在满足同、邻频约束条件下,寻求一组频率使得每台发射机尽量指配可用频率中的最低频率(无可用频率的将不被指配),并使得人口覆盖率最高。以局部搜索算法为参照,将模拟退火算法应用到频率指配问题中,结果表明模拟退火算法的指配结果质量明显优于局部搜索算法。并针对模拟退火算法的耗时性使用 OpenMP 指令优化约束检测代码,在多核计算机上运行取得了很好的加速效果。

关键词:局部搜索;模拟退火;频率指配;OpenMP;约束检测

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2011)07-0121-04

Optimization of Simulated Annealing in Solving Frequency Assignment Problem

LU Li-wei^{1,2}, WANG Liang¹, LIANG Yong², FAN Rong-shuang¹

(1. Research Center of Government GIS, Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China;

2. School of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: Given coordinates and usable frequencies of transmitters, considering co-channel constraint, adjacent channel constraint and population coverage, build a mathematic model of frequency assignment. It means that with the satisfaction of co-channel constraint and adjacent channel constraint, to find a group of frequencies which make each transmitter assigned the lowest frequency selected from usable frequencies (not to assign if no usable frequencies available) and make the population coverage maximum. Took local search as reference, applied simulated annealing into frequency assignment problem, the result shows that simulated annealing is obviously better than local search. Using OpenMP instructions to optimize the restriction check code to overcome time-consuming characteristic of simulated annealing, the program achieved good performance of speedup when implemented on multicore computer.

Key words: local search; simulated annealing; frequency assignment; OpenMP; restriction check

0 引言

随着科技的发展和人们生活水平的提高,电视节目也向着多层次、多样化、个性化发展,电视频道还要进一步细分,频道数还要增加,同时数字化的推进使得新型广播电视业务层出不穷,这些新业务对无线电频率也有着新的需求^[1]。电视频道的细分和扩充以及广播电视新业务的增加给我国频率资源的合理使用带来了巨大的挑战。

频率指配是研究合理规划和利用频率的重要内

容。频率指配算法就是给每个需求指配一个合适的频率,同时该指配与现有和规划的台站频道之间不会产生干扰^[2]。频率指配可以归结为满足一定约束条件下的线性优化问题^[3]。

目前已有许多方法用于解决频率指配问题,如贪心算法、局部搜索算法、禁忌搜索算法、模拟退火算法、遗传算法、人工神经网络算法、蚁群算法等^[4]。其中模拟退火算法在美国地面数字电视频率指配中的应用提高了其频率资源的使用效率^[5]。由于发达国家对相关频谱技术的高度保密,使我们对相关技术知之甚少,国内的研究也处在起步阶段,仅仅停留在理论研究和小规模实验阶段。

文中研究使用模拟退火算法来解决频率指配问题,并对模拟退火算法在频率指配问题中的实验性能进行了分析和探讨。

收稿日期:2010-12-09;修回日期:2011-03-16

基金项目:国家质量监督检验检疫总局科技公益专项(200910245)

作者简介:路立伟(1985-),男,硕士,研究方向为地理信息系统开发与应用、频率指配算法;王亮,硕士,研究员,研究方向为电子政务、政府地理信息系统设计开发和应用;梁勇,博士,教授,研究方向为数字技术与应用。

1 问题的数学模型

文中提出了相应的频率指配数学模型,即给定一组发射机,给定每台发射机的可用频率表和坐标,在满足同、邻频约束条件下,使得每台发射机尽量指配可用频率中的最低频率(无可用频率的将不被指配),并使得人口覆盖率最高。

目标函数描述如下:

$$y_{\min} = \mu_1 \sum_0^i F[i] + \mu_2 \frac{\sum_i P[i]}{\sum_0^i P[i]} + \mu_3 \sum_0^i \text{unassign}[i]$$

约束条件:

$$\text{s.t. } F[i] \in FT[i][j]; \quad (0 \leq j \leq 48)$$

$$F[i] \neq F[j]; \quad (0 \leq D_{ij} < D_{co})$$

$$|F[i] - F[j]| \geq \text{span}; \quad (D_{co} \leq D_{ij} < D_{adj})$$

其中: i 为发射机ID, $F[i]$ 为第 i 台发射机的指配频率,是从 $FT[i][j]$ 中选取的可用频率;

在我国,地面电视业务可用的频道有48个。

$FT[i][j]$ 为第 i 台发射机的可用频率表,如果48个频道都是候选可用频率,则频道取值范围为 $\{13, 14, 15, \dots, 58, 59, 60, 99\}$,无可用频率以99标识,禁忌频道以0标识;例如,某发射机的14频道为禁忌频道,则其可用频率表为 $\{13, 0, 15, \dots, 58, 59, 60, 99\}$ 。

$P[i]$ 为第 i 台发射机所覆盖的人口;当发射机未指配可用频率时,其覆盖人口为0; $\sum P[i]$ 为指配了可用频率的发射机覆盖的总人口数。

$\text{unassign}[i]$ 为第 i 台发射机是否被指配了可用频率(指配则赋值为1,反之为0)。

μ_1 为发射机指配频率之和的权重值, μ_2 为人口覆盖率的权重值(负值), μ_3 为未指配发射机台数的权重值。

D_{ij} 为发射机 i 与发射机 j 的距离; D_{co} 为同频约束距离;小于同频约束距离的两台发射机不能指配同一频率。 D_{adj} 为邻频约束距离; span 为频率带宽;大于等于同频约束距离但小于邻频约束距离的两台发射机指配的频率要保持一定的频率带宽。

此数学模型将频率指配问题转化成为求解目标函数最小值的解的问题,其实质就是一个带约束条件的组合优化问题。

2 模拟退火算法在频率指配中的应用

2.1 发射机分类

根据读入的发射机坐标算出两两发射机的欧氏距离,继而将发射机的相互关系通过距离划分为:孤立发射机(和任意发射机之间距离都大于邻频约束距离,可以指配任意频率)、同频约束发射机(与某发射机距

离小于同频约束距离)和邻频约束发射机(与某发射机距离大于等于同频约束距离且小于邻频约束距离)。

2.2 模拟退火算法

模拟退火算法是局部搜索算法的变种,是一种通用的概率算法,用来在一个大的搜索空间内寻找命题的最优解。1953年由Metropolis等人首先提出。1983年被Kirkpatrick等人应用到组合优化问题中^[6,7]。

模拟退火算法源于固体退火过程:将固体加温到温度充分高,再让其徐徐冷却,加热时固体内部粒子随温度的上升而变为无序状态,内能增大;而徐徐冷却时粒子渐趋有序,在每个温度都达到平衡态,最后在常温时达到基态,内能减为最小。

据Metropolis准则,粒子在温度 T 时趋于平衡态的概率为 $\exp(-\Delta E/(kT))$,其中 E 为温度 T 时的内能, ΔE 为其改变量, k 为Boltzmann常数。

模拟退火算法的典型特征就是除了接受目标函数的改进解外,还在一定概率下接受非改进解,这样便能有效地避开局部最小解,使最终解更趋向于最优解。

模拟退火算法十分适于求解文中所建立的频率指配问题模型,其计算过程就是尝试不同的指配方案,并不断更新和优化指配方案的过程。

2.2.1 初始指配方案

考虑到当发射机数量很多时,搜索的解空间变得很大,在约束条件苛刻的情况下产生随机指配方案将是一个耗时的过程。故文中将初始指配方案设定为每台发射机都有的99频道,即初始时发射机均未指配。

2.2.2 温度参数的控制

文中固定选取100度为初始温度,采用几何冷却方式,冷却率 α 为0.998,终止温度为0.0001度。内循环次数为1,采用的是非时齐模拟退火算法。

2.2.3 邻域结构

邻域解的产生原则为解应遍布全部解空间。由于多邻域下产生一个可行的指配方案会耗费较长时间甚至产生不了可行指配方案,故本实验中邻域结构为一邻域,即每次指配给随机ID号的发射机随机的可用频率。

2.2.4 约束检测

对于邻域结构产生的新指配方案是否能满足同、邻频约束和频率带宽约束,文中采用了约束检测,保证发射机之间满足以上约束条件。

C++约束检测代码如下:

```

BOOL OK=TRUE; //约束检测是否满足的标识
for(int j=0;j<n;j++)
for(int k=j+1;k<n;k++)
{

```

```
Int span=abs(f[j]-f[k]); //频率带宽
if(f[j]!=99&&f[k]!=99)//不包含无法指配的发射机
时
{
    if((span==0&&(d[j][k]<Dco))||((span<AdjSpan)&&
(d[j][k]<Dadj)&&(d[j][k]>=Dco)))//不满足同、邻频约束
条件
        OK=FALSE;//约束检测不满足
}
```

约束检测代码遍历两两发射机的距离矩阵,对产生的新指配方案进行同、邻频约束条件和频率带宽约束条件的检测。未通过约束检测的新指配方案将被拒绝,通过邻域结构重新生成指配方案再次进行检测。

2.2.5 解的迭代策略

通过约束检测的邻域解将通过目标函数值的比较来判断是否更新指配方案。

当邻域解小于等于当前解时接受,当邻域解大于当前解时按照一定的概率接受邻域解(恶劣解)。恶劣解的接受概率为: $P = \exp(-\Delta E/T)$;

通过接受概率与随机概率的比较来判断恶劣解的取舍。当接受概率大于随机概率时接受,反之则拒绝。

其中 ΔE 为邻域解与当前解的差值(负值),所以当恶劣解与当前解的差异较大时接受概率较低,接受概率的另一个制约因素为温度 T ,随着温度的降低,接受概率变小,直到最后不再接受恶劣解。

2.3 与局部搜索算法的性能比较

模拟退火算法可以看做是对局部搜索算法的改进,它们在算法描述、邻域结构和局部性态方面具有相似之处,鉴于局部搜索在求解组合优化问题中的成功,以局部搜索算法作为模拟退火算法的试金石来检验其试验性能是最为恰当的^[8]。

以 100 台发射机的频率指配为例,使用相同的发射机坐标和相同的可用频率表,相同的同、邻频约束条件与频率带宽,分别运行模拟退火算法和局部搜索算法各 30 次。其中局部搜索算法的尝试次数为 100 000 次,得到两种算法的结果对比(见表 1)。

表 1 模拟退火算法与局部搜索算法结果对比

算法	平均值	最大值	最小值
局部搜索算法	3043.569	3245.452	2865.460
模拟退火算法	2753.072	2972.298	2498.986

可见模拟退火算法得到的目标函数平均值要明显优于局部搜索算法。虽然模拟退火算法能够有效地跳出局部最优解,但是模拟退火算法是基于概率的近似算法,Markov 链只记忆前一刻的状态,算法具有遗忘性,所以也有可能得到较差的解。

根据指配记录分别对取得最小目标函数值的两种算法的迭代值进行分析,得到了局部搜索算法的 200 到 1000 次迭代值的寻优曲线图(见图 1)和模拟退火算法的 2000 到 6000 次迭代寻优曲线图(见图 2)。

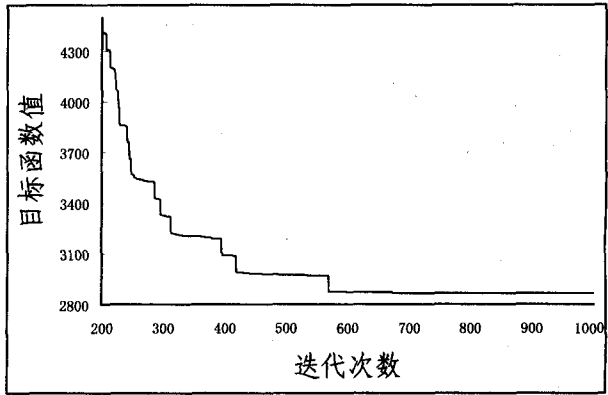


图 1 局部搜索算法寻优曲线

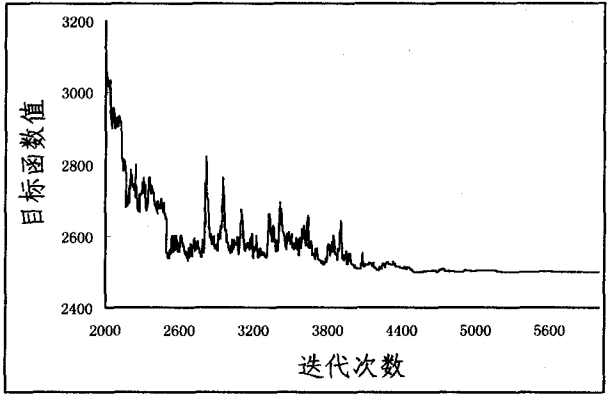


图 2 模拟退火算法寻优曲线

局部搜索算法在第 917 次迭代时取得了最小值 2865.460,极快的收敛到了局部最优解;而模拟退火算法在第 5332 次迭代时取得了最小值,但是由于温度没有降到最低而跳离了此值,在 5734 次迭代后由于温度降到足够低,一直保持此最小值至程序结束。

3 OpenMP

OpenMP 是一个共享存储并行系统上的应用编程接口。OpenMP 规范了一系列的编译制导、运行库和环境变量,使得用户能够控制并程序的行为。

OpenMP 主要针对细粒度(循环级)并行,使用 FORK-JOIN 并行执行模型。即程序开始于一个单独的主线程,遇到并行域开始并行执行,主线程创建一队并行的线程,并行域中的代码在不同的线程队中并行执行;当诸线程在并行域中执行完之后,它们或被同步或被中断,最后只有主线程在执行^[8]。

3.1 OpenMP 开销代价

对于大量的科学计算程序来说,循环计算通常占有很大的比例,对循环进行并行化处理可以大大提高应用程序的运行效率,因此循环并行化在 OpenMP 应

用程序中是一个相对独立且非常重要的组成部分^[9]。

但是并非所有循环添加 OpenMP 指令后都可以加速,经测试当循环数较小时(即发射机台数较少时,小于等于 40 台时)频率指配速度更慢,这是因为增加了固定的启动开销和每线程开销,以至于使线程化代码变得没有意义。

3.2 OpenMP 的任务调度

OpenMP 中任务调度使用 schedule 子句,其使用格式为:schedule(type[, chunk])。

OpenMP 共有 static、dynamic、guided 和 runtime 四种调度类型^[10]。

默认情况下是 static 调度方式,此方式为多个 CPU 分配固定的循环块,而约束检测代码这个双重循环中每次迭代的计算量不同,所以在本实验中选取 dynamic 调度方式,在约束检测代码的外循环前面添加 OpenMP 指令“#pragma omp parallel for schedule(dynamic)”,这样能够充分利用多核,均衡任务负载,从而取得更快的加速。

4 OpenMP 优化结果分析

由于冷却进度表的控制作用,模拟退火算法的时间复杂度为 $O(kL_m f(n))$ 。其中 k 为迭代次数, L_m 为 k 个 Markov 链中的最大长度, $f(n)$ 为问题规模 n 的多项式函数^[11]。

因为大规模的频率指配问题将会引起“组合爆炸”,当发射机数量较大时,此时约束检测代码的运行时间也将变得漫长,必然会影响模拟退火算法的运行效率。因此采用 OpenMP 来优化约束检测代码这个每次迭代中最耗时的部分将会取得一定的加速效果。

采取的实验平台为:Dell Optiplex960 系列四核计算机,CPU 时钟频率为 2.66GHz,操作系统为 Windows XP Professional 2002,编译器为 Microsoft Visual Studio 2005。

在此以 100 为单位递增到 2000 台发射机为例,统计优化前后在相同模拟退火参数下的运行时间,其中运行时间为 3 次测试的平均值。在此并不考虑算法获得解的质量。

优化前后运行时间对比见图 3,由于少于 400 台发射机的时候 OpenMP 的线程开销还占有一定比重,所以其加速比小于 3;随着规模的增加,线程开销所占比重逐渐下降,加速比也稳定在 3.4~4.0 之间,统计得到 400 到 2000 发射机平均加速比为 3.813,可见优化后的程序充分利用了多核的优势,取得了明显的加速。

值得注意的是,当约束检测代码在每次迭代中耗时所占比重较小时将会出现优化瓶颈,加速比会明显

降低,所以应尽量保证迭代过程中计算代码的简洁和紧凑,避免多余的计算和文件读写过程。

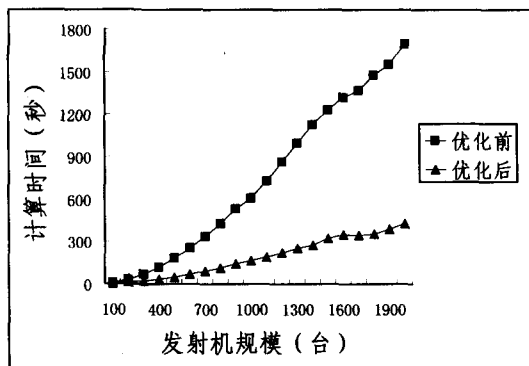


图 3 OpenMP 优化前后计算时间对比

5 结束语

通过实验得到以下结论:模拟退火算法与局部搜索算法相比在处理频率指配问题上更具优势,但其耗时迭代计算是制约其使用的一个瓶颈。使用 OpenMP 优化约束检测代码的双重循环部分能起到不错的加速效果,但是这并没有改变模拟退火算法整体上的串行性。

目前 SMP 集群系统是大型计算机系统的一个发展趋势^[12],如何在 SMP 集群环境下对模拟退火算法进行并行优化是下一步要研究的方向。

参考文献:

- [1] 张虹. 广电发展需要频率资源保障[N]. 人民邮电, 2007-11-23(7).
- [2] 邹峰,李薰春,史虹湘,等. 地面电视频率规划与优化[M]. 北京:中国广播电视出版社,2008.
- [3] 李薰春,史虹湘,杨明,等. 基于模拟退火算法的地面电视频率指配方法研究[J]. 广播与电视技术,2008(4):27-30.
- [4] Aardal K I, van Hoeselt S P M, Koster A M C A, et al. Models and Solution Techniques for Frequency Assignment Problems[DB/OL]. 2001-12. <http://www.zib.de/Publications/Reports/ZR-01-40.pdf>.
- [5] 李薰春,杨明. 地面数字电视频率指配方法研究[J]. 电视技术,2008,32(3):4-7.
- [6] Metropolis N, Rosenbluth A W, Rosenbluth M N, et al. Equation of state calculations by fast computing machines[J]. Chem. Phys., 1953,21(6):1087-1092.
- [7] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by Simulated Annealing[J]. Science, 1983,220:671-680.
- [8] 陈国良,安虹,陈峻,等. 并行算法实践[M]. 北京:教育出版社,2004.
- [9] 黄猛. OpenMP 的多核并行程序设计[J]. 电脑编程技术与维护,2009(17):35-38.

(下转第 128 页)

公式(3)中, l, l' 为自动机的节点; a 为动作; g 为守护; r 为复位(重新赋值函数)。

3 系统验证

Panschema 平台是为中石油量身定制的二次开发平台,用基于 SOA 的反射工厂模式开发,运行于 .Net 环境下。该平台实现了满足客户所有需求的功能,能根据不同用户的不同选择,生成不同的报表,只要具有简单数据库知识的工作人员就可以随意制定出符合报表需求的各种功能和样式的报表系统。

通过前端获取的用户输入,填写卡片数据,然后编辑卡片窗口,如图 4 所示。完成后,反射自动生成数据库表和 XML 文件,在此过程应用了基于 SOA 的反射工厂模式。此步骤用来定义报表的显示内容和格式。

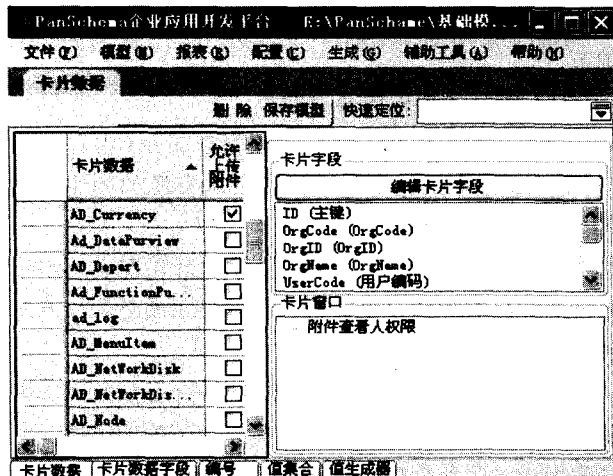


图 4 PanSchema 系统卡片数据界面

填写表单数据,然后生成表单窗口,如图 5 所示。此步骤用来定义多个报表的显示模式。

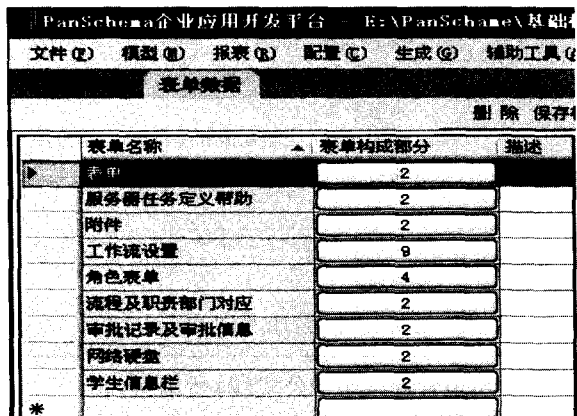


图 5 PanSchema 系统表单数据界面

填写菜单项以后,每一个菜单项选择一个处理功能。

最后点击生成,生成各种文件,并上传到服务器,就可以在内控系统中登录并看到自己选择设置的界面和功能。

4 结束语

文中在分析了现在流行的 SOA、反射工厂模式和中间件技术三种软件设计方法之后,提出了组合三种方法的基于 SOA 的反射工厂模式,并通过 Panschema 系统得到验证,基于 SOA 的反射工厂模式能实现面向服务和用户的高交互性,和其他模式相比,该组合模式在代码复用、交互性、耦合度、系统优化等方面都具有明显的优势。

参考文献:

- [1] Andrei M, Ang J. Patterns: Service-Oriented Architecture and Web Services [M]. [s. l.]: IBM Redbooks, 2004.
- [2] 毛新生. SOA 原理、方法和实践 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [3] 甄 镭. .Net 与设计模式 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [4] Erl T. SOA 概念、技术与设计 [M]. 王满红, 陈荣华, 译. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [5] Capra L, Emmerich W, Mascolo C. CARISMA: Contextaware reflective middleware system for mobile applications [J]. IEEE Trans on Software Engineering, 2003(10): 4-5.
- [6] 黄 昱, 王千祥, 梅 宏, 等. 基于软件体系结构的反射式中间件研究 [J]. 软件学报, 2003, 14(11): 1819-1826.
- [7] 李 冰, 许林英. 中间件平台的反射技术 [J]. 计算机应用研究, 2003(8): 47-50.
- [8] 杨思中, 刘锦得, 骆志刚. 反射中间件的研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2002, 23(5): 618-622.
- [9] Maes P. Concepts and experiments in computational reflection [C]//OOPSLA'8. [s. l.]: [s. n.], 1987.
- [10] 谷玉奎, 曹宝香, 袁玉珠. 基于 SOA 的分布式构件库管理模式 [J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(4): 101-103.
- [11] 林 闯, 单志广, 任丰原. 计算机网络的服务质量 (QoS) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [12] 李莹峰, 邓晓衡. DHT 网络中基于测量的 QoS 监控系统 [J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(5): 101-103.
- [13] 姚世军, 陈楚湘, 党力明, 等. 动态选择 Web 服务的 QoS 本体设计 [J]. 计算机工程与设计, 2008(6): 1548-1550.

(上接第 124 页)

- [10] 蔡佳佳, 李名世, 郑 峰. 多核微机基于 OpenMP 的并行计算 [J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(10): 87-91.
- [11] 康立山, 谢 云, 罗祖华. 非数值并行算法: (第一册) 模拟

退火算法 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.

- [12] 宋 伟, 宋 玉. 基于 SMP 集群系统的并行编程模式研究与分析 [J]. 计算机技术与发展, 2007, 17(2): 164-167.