

# 矿井通风系统三维可视化及网络解算优化

王李管<sup>1</sup>, 王喆<sup>1</sup>, 黄俊歆<sup>1,2</sup>, 吴丽春<sup>1</sup>

1. 中南大学资源与安全工程学院数字矿山研究中心, 长沙 410083
2. 湖南工学院安全与环境工程系, 湖南衡阳 421001

**摘要** 针对目前通风软件功能存在局限性的现状, 结合矿山开采深度增加和通风网络越来越复杂的实际, 开展了新型矿井通风系统三维可视化研究。基于回路风量法和节点风压法提出了新的改进解算算法, 使其能够解决复杂的通风网络解算问题; 根据新的矿井通风系统双线巷道自动生成算法逐层生成闭合轮廓线, 将各层轮廓线三角化并将所有的三角化网格合并, 生成封闭的三维联通实体巷道; 采用“层次式平台+插件”的方法进行系统开发。最终实现了通风系统三维可视化模拟、网络解算优化、通风管理信息化; 与矿山数字化软件相结合, 可有效集成监控监测系统, 实现数据管理一体化和矿山安全管理。

**关键词** 三维可视化; 通风系统; 网络解算

**中图分类号** TD72

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.14.001

## Research on 3D Visualization and Network Solution Optimization of Mine Ventilation System

WANG Liguan<sup>1</sup>, WANG Zhe<sup>1</sup>, HUANG Junxin<sup>1,2</sup>, WU Lichun<sup>1</sup>

1. *Research Center of Digital Mine, School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China*
2. *Department of Safety and Environment Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang 421001, Hunan Province, China*

**Abstract** At present there are a lot of shortages in the function of ventilation software. The depth of mining is getting increased and ventilation network is more and more complicated. Therefore a new 3D visualization system of mine ventilation network was studied to solve above problems. Based on the method of circuit air-quantity and node ventilation pressure, a new improved ventilation network solution algorithm was put forward to calculate complex ventilation network. Based on a novel algorithm of double-line laneway automatic generation for mine ventilation system, closed contour was generated layer by layer, then the contours were triangulated and all the triangulated mesh was combined to generate 3D connected entitative laneway. System developing was made adopting the method of 'hierarchical platform+plug-in'. The system realized 3D visualization simulation of ventilation system, network solution optimization, ventilation management informatization. Its combination with mine digital software can effectively integrated monitoring detection system, realizing data management integration and safety management.

**Keywords** 3D visualization; ventilation system; network solution

### 0 引言

中国在矿井通风网络分析方面取得了许多成果, 也编制了不少关于矿井通风的软件, 得到了不同程度的应用, 减轻了用户的工作量, 为矿山通风科学管理带来极大方便。随着开采技术的发展和开采深度的增加, 矿井通风问题越来越突出, 增加了管理的难度。矿井通风系统数字化是解决问题的

有效方法之一, 传统软件在网络解算时应用节点风压法和回路风量法最多, 但节点风压法在风压初值赋值不太合理的情况下不能解算, 回路风量法不能解算有单向回路的通风网络<sup>[1-3]</sup>。传统的二维可视化技术难以表达复杂采矿过程中的地下三维地质与工程问题。目前国内外矿井通风三维建模技术尚未成熟。澳大利亚 VENTSIM 公司开发的软件最具代表性, 但该软

收稿日期: 2012-03-20; 修回日期: 2012-04-20

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2011AA060407); 湖南省教育厅科研项目(10C0573)

作者简介: 王李管, 教授, 研究方向为数字矿山与矿山安全, 电子信箱: liguan\_wang@163.com

件中三维巷道也仅采用非联通建模技术。由此可见,已有软件在不同程度上出现了一定的局限性,如功能比较单一,可视化程度不高,缺乏统一规划<sup>[4-6]</sup>。这些不足限制了矿井通风系统软件的推广和使用。

针对这种现状,本文开展新型矿井通风系统三维可视化研究,依据数字采矿软件平台和功能插件形成三维矿井通风仿真系统。

### 1 系统总体设计

通风安全管理涉及采矿工程、矿井通风与安全、测量学、计算机、数据库等多学科知识,矿井通风系统特点是用风地点分散、信息量大、通风网络结构和巷道通风参数等具有动态特性。因此,矿井通风可视化系统具有多学科综合、专业性强的特点。基于研究内容制定的系统总体设计方案见图 1。

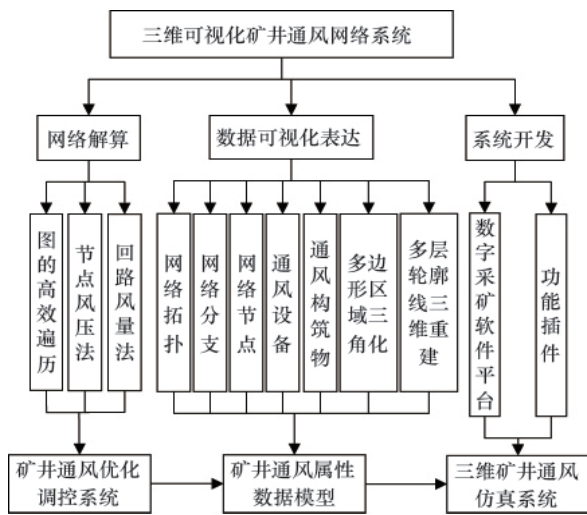


图 1 系统总体设计  
Fig. 1 Overall design of the system

### 2 通风网络模型和解算

解算方法在网络解算系统中起着重要作用,直接关系到所建模型能否正确反映风网的拓扑关系、风流流向及运动规律,其稳定性以及收敛速度将影响整个程序的可靠性和效率<sup>[7-8]</sup>。由于传统的节点风压法在风压初值赋值不太合理的情况下不能解算,回路风量法不能解算有单向回路的通风网络,所以综合这两种方法,提出新的改进解算算法,使其能够解决任意复杂的通风网络解算问题。

#### 2.1 数学模型

##### (1) 回路风量法数学模型

设风网中分支数为  $I$ , 节点数为  $J$ , 则独立回路数  $M=I-J+1$ 。

1. 风量平衡方程和在任一闭合回路中的风压平衡方程为

$$\sum_{i=1}^I a_{ij} Q_i = 0 \quad j=1, 2, \dots, J-1 \quad (1)$$

其中,  $a_{ij}$  为支路  $i$  与节点  $j$  流向函数,  $Q_i$  为第  $i$  条支路的风量。

$$\sum_{i=1}^{I_k} b_{ki} R_i |Q_i| - \sum_{i=1}^{I_k} b_{ki} H_{f,ki} - b_{ki} H_{vp,ki} = 0 \quad (2)$$

其中,  $b_{ki}$  为支路  $i$  与网孔  $k$  的方向函数,  $R_i$  为闭合网孔中支路  $i$  的风阻值,  $H_{f,ki}$  为网孔  $k$  中支路  $i$  的风机风压值,  $H_{vp,ki}$  为网孔  $k$  中支路  $i$  的自然风压值,  $I_m$  为闭合网孔中所包含最大支路数。

式(1)和式(2)构成以风量为未知数的  $N$  阶非线性方程组。该方程组直接求解很困难,一般将非线性方程线性化求解。将式(2)用泰勒级数展开,最终求得的回路修正风量的一般形式为

$$\Delta Q_k = \frac{\sum_{i=1}^b (R_i Q_i |Q_i| - H_{f,ki} \pm H_{vp,ki})}{\sum_{i=1}^b (2R_i |Q_i| - a_k)} \quad (3)$$

其中,  $\Delta Q_k$  为第  $k$  个网孔的风量增量值,  $a_k$  为风机特征曲线斜率  $dH_i/dQ$ ,  $b$  为第  $k$  个网孔中的分支数。

反复迭代计算,修正回路风量。当回路修正风量小于给定值,即  $|\Delta Q_k| < \varepsilon$  时,求得近似真实解。

#### (2) 节点风压法数学模型

在分支  $k$  上选一个参考节点  $v_j$ , 对纯风阻巷道有

$$q_j = \text{sign}(h_j + h_{Nj}) \sqrt{|h_j + h_{Nj}| / r_j} \quad (4)$$

其中,  $q_j$  为节点所在纯风阻巷道的风量,  $h_j$  为通风阻力,  $h_{Nj}$  为自然风压,  $r_j$  为巷道风阻。

类似地,对于纯风机分支,风机特性曲线取下列形式:

$$q_j = a_j h_j^2 + b_j h_j + c_j \quad (5)$$

其中,  $a_j, b_j, c_j$  为风机特性曲线系数,  $h_F$  为风机压力。

根据节点风量平衡定律,某节点各分支的风量满足风量平衡方程

$$f_i = \sum_{j \in S_R} a_{ij} \text{sign}(h_j + h_{Nj}) \sqrt{|h_j + h_{Nj}| / r_j} + \sum_{j \in S_F} (a_j h_j^2 + b_j h_j + c_j) + \sum_{j \in S_b} a_{ij} q_j^0 = 0 \quad (6)$$

其中,  $S_R, S_F$  分别为纯风阻分支和纯风机分支的编号集合;  $S_b$  为按需供风分支的集合;  $a_{ij}$  表示节点  $i$  和  $j$  所构成分支的风流方向。若  $a_{ij}=1$ , 则节点  $i$  和  $j$  构成分支且风流方向为  $i \rightarrow j$ ; 若  $a_{ij}=-1$ , 则节点  $i$  和  $j$  构成分支且风流方向为  $i \leftarrow j$ ; 若  $a_{ij}=0$ , 则节点  $i$  和  $j$  不构成分支。

利用主节点风压偏微分近似法,得到节点风压迭代公式为

$$\Delta p_i^{(k)} = \frac{-f_i^{(k)}}{\partial f_i / \partial p_i} \quad (7)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial p_i} = \sum_{j \in S_R} \frac{a_{ij}^2}{2\sqrt{r_j |h_j + h_{Nj}|}} - \sum_{j \in S_F} a_{ij}^2 (2ah_{vj} + b_j) \quad (8)$$

当风压修正值小于给定值,即  $|\Delta p_i^{(k)}| \leq \varepsilon$ , 迭代计算结束。

#### 2.2 解算算法

改进的解算算法能够解决通风网络解算中的单向回路问题。所谓单向回路就是回路中所有分支的风流方向一致,

单向回路在矿井通风网络中表现为循环风<sup>[9]</sup>。发生循环通风可能是由于诸多因素,如矿井火灾时期的风流逆转、安排不当的风机或在网络解算时人为输入错误的参数<sup>[10-12]</sup>。在一般非灾变时期下,井下风机位置或风机功率的选择不合理,会导致其旁侧风路风流发生逆转。因此,单向回路中至少有1条分支为风机分支。将该条分支固定风量,不参与风网解算的计算过程,该回路可避免在解算过程中形成单向回路。算法描述如下。

第1步,调用回路风量法进行网络解算;

第2步, $k=0$ ;

第3步,设修正网孔 $k$ 中各分支风量前后闭合回路差分别为 $\Delta H_{k0}$ 和 $\Delta H_{k1}$ ,若 $\Delta H_{k1} > \Delta H_{k0}$ ,且网孔 $k$ 中有风机分支存在,则网孔 $k$ 为单向回路,进行下一步,否则进行第5步;

第4步,取1条风机分支,用当前风机风量值将其设为固定风量分支;

第5步, $k=k+1$ ,若所有网孔已遍历完,进行下一步,否则返回第3步;

第6步,若网络已收敛,进行下一步,否则返回第1步;

第7步,恢复固定风量分支为风机分支,调用节点风压法进行网络解算,直至收敛。

算法流程图见图2。

实现算法调用回路风量法进行解算,若有单向回路时,

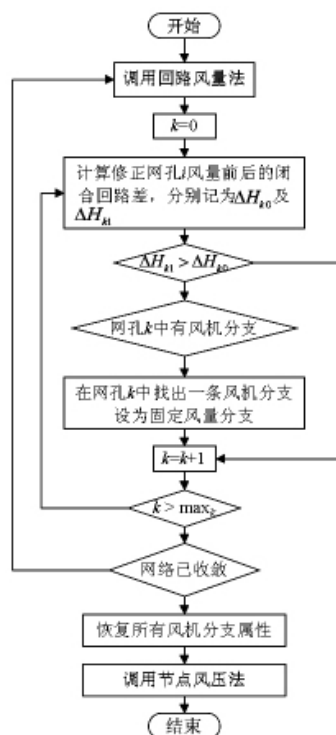


图2 网络解算算法流程

Fig. 2 Flowchart of network solution algorithm

将某条风机的分支设定固定风量值,如此循环直至网络收敛;若未出现单向回路,可直接给出解算结果。这样等于为通风网络加入1个使解算过程收敛的扰动因素,网络收敛后,

恢复所有风机的分支属性,将其计算结果作为节点风压法的初值。此算法能解决单向回路的通风网络解算问题,具有快速收敛性,并能得到比较合理的风量风压初值。

### 3 数据可视化表达

三维联通巷道的构建需运用双线巷道自动生成方法和多边形的三角剖分。

本文采用一种新的矿井通风系统双线巷道自动生成算法,其根据逆时针搜索、最外层轮廓线优选提取策略,提取网络拓扑结构图中的所有闭合轮廓线,对闭合轮廓线进行右偏移操作,最终生成实交点处贯通、虚焦点处下行巷道遮挡部分消隐的双线巷道图<sup>[13]</sup>。

多边形的三角剖分是指在不产生新顶点的前提下将平面多边形划分成一系列互不重叠的三角形<sup>[14]</sup>。国内外对这个问题作了大量研究。本文从多边形内在几何关系出发,建立适当的数据结构,实现一种快速三角化算法。该算法适应于带洞、岛的任意简单多边形,时间复杂度近似为 $O(n)$ <sup>[15]</sup>。其中, $n$ 为问题的规模,时间复杂度是该算法所求解问题规模 $n$ 的函数, $O(n)$ 表示这个函数是按线性递增的。

三维联通巷道构建的基本思想是:根据用户所需要的生成精度,从巷道底部到顶部插入若干个平行于巷道底板的面,面与巷道的相交形成一系列闭合轮廓线。再根据上述二维双线巷道生成方法,逐层生成闭合轮廓线。将各层轮廓线三角化并将所有的三角化网格合并,最终生成封闭的三维联通实体巷道。基于边界线的三维联通巷道建模主要分为两部分:一是对巷道的数据前处理,重复点、线的现象多存在于矿山的实例数据中,因此要进行重复点、线的删除操作,并将原先存储为\*.dwg和\*.dxf的二维平面数据的边界线附高程值;二是根据断面和边界线生成三维巷道模型,其中构成巷道的内、外边界线要闭合。建模基本步骤为:

- (1) 绘制或导入矿井通风系统单线图;
- (2) 删除重复点、重复线;
- (3) 提取多层闭合轮廓线;
- (4) 对各区域树表示的区域进行约束三角剖分;
- (5) 基于分层轮廓线进行三维重建。

数据分析将网络拓扑、网络分支、网络节点、通风设备、通风构筑物、污染源等数据结构与三维模型结合,建立矿井通风属性数据模型。三维模型建立后存为DMF数据,将DMF数据文件导入转换成DMV数据格式文件,或在系统中直接绘制DMV数据,然后可进行通风网络解算和风机优选设计。

其中,DMF数据与DMV数据的区别在于:DMV数据通过数据分析,将通风网络的拓扑结构和各类对象的属性数据包含在内;而DMF不包含数据属性信息。这些属性数据有分支数据、节点数据、风机数据、通风构筑物数据、风机数据库数据结构、污染源数据结构、网络离散模型中心点数据结构,数据属性包括几何属性(几何数据信息和附加属性信息)和逻辑属性(拓扑结构信息)两类。

#### 4 系统开发与应用

三维可视化矿井通风系统采用“层次式平台+插件”的方法,平台的主体程序能为所有的插件提供集成接口。为了平台和插件间通信时的调用,平台和插件需实现若干标准接口。实现该类型系统的编码包括以下部分:一是平台的插件处理机制,可以用来初始化所有插件,同时管理各个插件接口;二是插件接口函数定义,为方便开发人员调用,将所有插件接口函数进行封装。

插件实现方法为:COM 插件注册,Windows 系统中名为组件类别管理器的 COM 类(Component Category Manager),实现了 ICatInformation 和 ICatRegister 接口,可以用来分别查询和注册类别信息;通过为每个插件设置 1 个可特定识别的唯一标示类别号(CLSID),在平台菜单中插件的每个能调用的功能可生成 1 个命令 ID 或菜单项,可以通过内部函数调用或消息循环用来实现插件的调用;为接收插件发送的请求消息和插件传递平台消息,定义 1 个 IApplication Server 接口于平

台接口,为响应从平台发送过来的消息和读取插件功能模块的信息,定义 1 个 IPlugIn 接口于插件接口。

将该系统应用于狮子山铜矿。狮子山铜矿目前采用“中央进风、东西两翼回风”的 3 级抽出式通风。第 1 级系统主扇,第 2 级区域辅扇,第 3 级单元辅扇。解算有 275 条巷道,214 个节点,21 条固定风量巷。该巷道的三维通风系统模型见图 3。

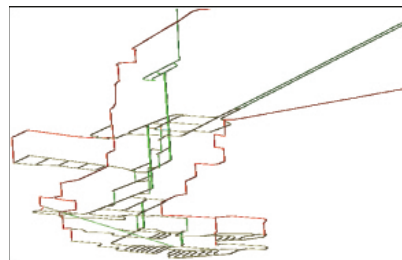


图 3 三维通风系统模型

Fig. 3 3D model of ventilation system

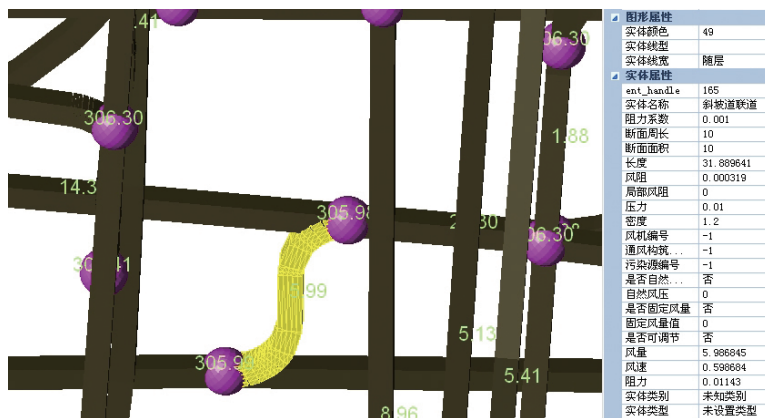


图 4 系统网络解算界面

Fig. 4 System interface of network solution

表 1 解算结果与实测数据对比  
Table 1 Comparison between computed results and measured data

巷道名称及测风位置	解算风量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	实测风量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	相对误差/%
八中段运输平巷	30.397	30.64	0.793
八中段坑口	29.740	29.83	0.302
十三中段机房,配电室	30.163	29.87	0.981
西部回风井出口	51.021	51.72	1.352
五中段排渣道	34.322	34.13	0.563
七中段总回风巷	43.438	42.92	1.207
十五中段泵房	12.140	12.05	0.747
炸药库	14.997	15.15	1.009
中央调度室	11.087	11.01	0.699
十三至十四中段斜井	22.646	22.86	0.936
斜井回风井	9.000	9.05	0.552
十至十一中段西部回风井	43.438	43.58	0.326

系统解算复杂通风网络的主界面如图 4 所示,分支巷道上的数字显示该分支的风量,节点上的数字显示该节点的风压。双击其中的任何一条分支,可以查看属性,包括详细的巷道参数,是否固定风量也在此设置。主要巷道解算结果与实测数据的比较见表 1。

由表 1 可知,解算结果与实测结果误差在实际应用的允许范围内。这说明该系统网络解算模型及结果具有可靠性。

#### 5 结论

结合矿井通风可视化系统具有多学科综合、专业性强的特点,制定系统总体设计方案;综合回路风量法和节点风压法的优点提出新的改进解算算法;根据新的矿井通风系统双线巷道自动生成算法,逐层生成闭合轮廓线,将各层轮廓线三角化并将所有的三角化网格合并,最终生成封闭的三维联通实体巷道;系统开发采用“层次式平台+插件”的方法。通过研究实现了通风系统三维可视化模拟、网络解算优化、通风

管理信息化、风机优选;与矿山数字化软件相结合,可有效集成监控监测系统,实现数据管理一体化。

### 参考文献 (References)

- [1] 黄光球, 陆秋琴, 姚玉霞. 大规模复杂通风网络节点风压解算方法[J]. 计算机工程, 2008, 34(4): 257-259, 271.  
Huang Guangqiu, Lu Qiuqin, Yao Yuxia. *Computer Engineering*, 2008, 34(4): 257-259, 271.
- [2] 姜仁义. 解算矿井通风网络的节点风压法 [J]. 金属矿山, 1991, 20(8): 18-20, 31.  
Jiang Renyi. *Metal Mine*, 1991, 20(8): 18-20, 31.
- [3] 刘剑, 贾进章, 于斌, 等. 通风网络含有单向回路时的通路算法 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2003, 22(6): 721-724.  
Liu Jian, Jia Jinzhang, Yu Bin, et al. *Journal of Liaoning Technical University*, 2003, 22(6): 721-724.
- [4] 林增勇. 矿井通风可视化系统研究与应用 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.  
Lin Zengyong. Research and application visualization system of mine ventilation[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008.
- [5] 魏连江, 王德明, 王琪, 等. 构建矿井通风可视化仿真系统的关键问题研究[J]. 煤矿安全, 2007, 38(7): 6-9.  
Wei Lianjiang, Wang Deming, Wang Qi, et al. *Safety in Coal Mines*, 2007, 38(7): 6-9.
- [6] 武晓敏. 矿井通风网络解算、调节与评价一体化研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.  
Wu Xiaomin. Study on the integration of mine ventilation calculation, regulation and assessment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [7] 杜翠凤, 张昊, 田文明, 等. 矿井通风网络解算可视化软件研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2007, 3(4): 51-54.  
Du Cuifeng, Zhang Hao, Tian Wenming, et al. *Journal of Safety Science and Technology*, 2007, 3(4): 51-54.
- [8] 王从陆. 复杂矿井通风网络解算及参数可调度研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2003.  
Wang Conglu. Study of the complicated mine ventilation network analysis and its adjustment limits of the relevant parameters [D]. Changsha: Central South University, 2003.
- [9] 刘剑, 贾进章, 郑丹, 等. 含有单向回路的风网平衡图绘制方法 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(2): 145-148.  
Liu Jian, Jia Jinzhang, Zheng Dan, et al. *Journal of Liaoning Technical University*, 2005, 24(2): 145-148.
- [10] Jia J. A new matrix-based mathematical model for determining unidirectional circuits in a ventilation network [J]. *Journal of Coal Science & Engineering (China)*, 2008, 14(2): 260-262.
- [11] 戚宜欣, 王省身, 鲍庆国. 矿井火灾时期风流流动及通风系统变化的动态模拟[J]. 中国矿业大学学报, 1995, 24(3): 19-23.  
Qi Yixin, Wang Xingshen, Bao Qingguo. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1995, 24(3): 19-23.
- [12] Liu J, Li Y, Zhao Q. Study on unidirectional circuit problem in multi-fan-station ventilation type of Jinchuan No. 2 mine [J]. *Journal of Coal Science & Engineering (China)*, 2008, 14(2): 257-259.
- [13] 黄俊歆, 王李管, 张力, 等. 一种新的矿井通风系统双线巷道自动生成算法[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(24): 221-224.  
Huang Junxin, Wang Liguan, Zhang Li, et al. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(24): 221-224.
- [14] 马小虎, 潘志庚, 石教英. 基于凹凸顶点判定的简单多边形 Delaunay 三角剖分[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999, 11(1): 1-3.  
Ma Xiaohu, Pan Zhigeng, Shi Jiaoying. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 1999, 11(1): 1-3.
- [15] 毕林, 王李管, 陈建宏, 等. 快速多边形区域三角化算法与实现[J]. 计算机应用研究, 2008, 25(10): 3030-3033.  
Bi Lin, Wang Liguan, Chen Jianhong, et al. *Application Research of Computers*, 2008, 25(10): 3030-3033.

(责任编辑 安莹, 吴晓丽)

· 学术动态 ·

## “2012 年第四届中国科学院博士后 学术年会”征文

“2012 年第四届中国科学院博士后学术年会”计划于 2012 年 6 月 14—15 日在杭州市。会议由中国科学院博士后联谊会, 浙江省临安市人才办公室主办。

征文范围: 夸克-轻子味物理(CKM 和 PMNS 混合矩阵唯像学); CP 对称性破缺与对称破缺机制; 轻味物理与有效理论; 重味夸克与稀有衰变; 顶夸克与黑格斯粒子; LHC 上的新味物理; 非微扰 QCD 与 ADS/QCD; 引力-规范对偶理论; 与味物理相关的宇宙学; 宇宙中重子数产生与物质-反物质不对称; 暗物质与中微子宇宙物理; 暗能量与早期暴涨宇宙。

论文截止日期: 2012 年 5 月 25 日。

电子信箱: postdoctor@ia.ac.cn。

会议网站: <http://meeting.sciencenet.cn/cinfo.aspx?cid=2646>。