

基于液态缩尺模型的大空间下送中回分层 空调回风汇流速度场研究

吴丹¹, 黄晨¹, 王昕¹, 秦俊²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海融创绿城投资控股有限公司, 上海 200050)

摘要: 选择某大空间实型建筑, 根据相似理论建立液态模型实验台, 研究大空间下送中回分层空调回风流场的汇流特性。论文利用二维微元汇流叠加方法获得汇流速度理论公式, 利用粒子图像测速技术 PIV (Particle Image Velocimetry) 拍摄回水流域, 获得其速度矢量信息; 实验发现计算得到回风流场的理论速度值与实验速度值存在较大的偏差, 对二维汇流速度理论公式修正后, 平均相对误差减少到 8.5%。论文最后通过相似比例提出大空间下送中回分层空调回风二维汇流速度半经验公式, 这为大空间建筑下送中回热环境研究提供了理论参考。

关键词: 液态缩尺模型; 大空间下送中回; 粒子图像测速技术; 汇流速度场; 二维汇流速度半经验公式
中图分类号: TU831.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-643X(2016)02-0169-05

Study on velocity flow field near air return inlet with stratified air conditioning of low sidewall air supply and middle sidewall air return in large space building based on liquid scale model

WU Dan¹, HUANG Chen¹, WANG Xin¹, QIN Jun²

(1. School of Environment and Architectural, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Sunac Greentown Investment Holdings Limited, Shanghai 200050, China)

Abstract: The paper chose a large space real building and established an experimental station of liquid scale model according to similarity theory. It studied the convergence characteristics of stratified conditioning air flow in large space. The theory formula of convergence velocity is derived by two-dimensional micro-unit speed superposition method. Return water flow field is shot by PIV (Particle Image Velocimetry) technology so as to get velocity vector information; it was found there is a large velocity deviation between the calculated and experimental values in return water flow velocity field, however, the deviation is greatly reduced to 8.5% after revising the two-dimensional theory formula are by use of experimental data. Finally, the paper proposes the semi-empirical formula of two-dimensional suction velocity in large space with stratified air conditioning of low sidewall air supply and middle sidewall air return by similar proportion. The result can provide a theoretical reference for the study of thermal environment in large space building.

Key words: liquid scale model; low sidewall air supply and middle sidewall air return in large space; PIV; suction velocity field; semi-empirical formula of two-dimensional suction velocity

1 研究背景

为满足不同类型大空间建筑室内热环境的需要, 下送中回分层空调形式的应用得到重视, 由于它

具有节能与改善室内空气品质的特点, 下送中回分层空调得到日益推广。下送中回回风口安装高度一般可作为下部非空调区与空调区的分界面, 其界面上的气流运动与传统喷口送风以送风口为界面的情

收稿日期: 2015-07-19; 修回日期: 2015-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278302, 51108263)、沪江基金 (D14003)

作者简介: 吴丹 (1990-), 男, 河南项城人, 在读硕士研究生, 研究方向: 大空间分层空调负荷计算。

通讯作者: 黄晨 (1958-), 女, 上海人, 博士, 教授, 研究方向: 大空间建筑室内环境及空调设计研究。

况明显不同,无法利用目前设计手册^[1]中的分层空调负荷预测方法计算界面间的对流热转移负荷。本文在前期下送中回分层空调对流热转移形成机理研究的基础上^[2],重点研究基于液态缩尺模型下送中回回风流场的汇流特性,为计算界面间的对流转移热负荷提供理论参考。汇流理论是从 19 世纪后期水文研究中开始形成的,在 20 世纪 30-60 年代取得重大突破^[3],1921 年, Ross 提出了面积-时间曲线,以获得等流面在一段时间内的汇流流量;1932 年谢尔曼提出单位线方法,以求解单位线流量获得汇流总量,该方法在世界范围许多流域的汇流计算中得到广泛应用,并且得到较高的精度。对于如排风罩的空气汇流计算,我国通常使用美国工业卫生协会和前苏联的计算方法计算汇流量^[1,4],以控制排风罩尘源扩散。南华大学的彭小勇等^[5]采用微元汇流叠加方程,分析了有无法兰的排放罩汇流流场分布,结果与实验基本吻合。对于空调房间的回风口近处流场,一般按点汇原理求解汇流^[6],是否能按微元汇流叠加概念求解,值得研究。实际上回风口附近流场与回风口几何形状、布置形式等有关,对于大空间下送中回分层空调,回风口附近流场决定了回风抽吸上部高温气体量的大小,即决定了大空间分层空调能耗的大小,因此研究大空间下送中回回风附近流场特性对回风抽吸上部高温气体、乃至分界面对流热转移具有一定学术意义。

在大空间建筑中,由于其内部结构复杂、热环境特殊以及室内气流运动多变,故在实际建筑中直接测试其流场变得非常困难^[7]。液态缩尺模型^[8]的使用可以很好地解决这一问题,是目前研究气流运动常用的方法之一,它利用具有一定浓度的盐水在清水中的运动,可以有效地模拟非等温气流运动导致的室内温度分布,如果这种盐水模拟实验与 PIV 技术结合,便可了解室内关注点的流动状态,从而达到研究室内流动比较复杂的大空间建筑室内热环境及其流动特性的目的。PIV 技术不仅能使流场可视化,而且能够提供流场瞬时定量信息,为此近年来 PIV 技术在本领域内的盐水或气态缩尺模型中得到广泛应用^[9]。

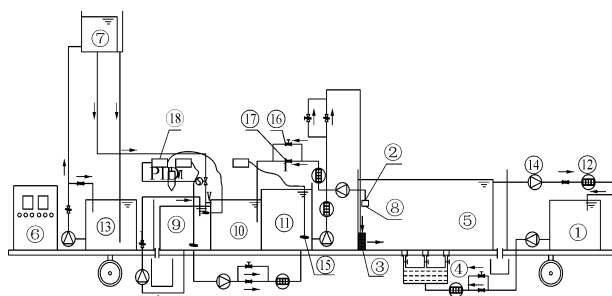
本文以某一典型大空间建筑为原型,建立液态缩尺模型模拟下送中回分层空调气流组织形式,采用微元汇流叠加方程,获得回风吸风口朝下的二维汇流流场理论式,利用 PIV 技术测得的回风汇流流场速度矢量值,实验修正获得二维汇流速度半经验公式。

2 液态缩尺模型实验系统及其配套 PIV 测试系统

2.1 实验台简介

所建液态模型的原型以上海理工大学大空间实验基地中送回风口为对象,原型采用柱状直径为 600 mm 的半圆下送风口,回风口为直径 400 mm 的圆形风口。利用相似原理^[10],以 1:15 的几何比例搭建了盐水缩尺模型实验系统,受现场条件限制,模拟回风口离环境室短边壁面间距的比例尺小于 15。大空间环境模拟室模型尺寸 0.99 m × 0.54 m × 0.5 m,模拟送风口直径为 40 mm,模拟回风口直径为 26 mm,均布置于环境室短边中部,与环境室边界距离和原型两送风口间距一致,以避免边界对送风流场的影响。

如图 1 所示为液态模型实验台系统示意图,该系统主要由液态供水系统、模拟热源的清水系统、模拟建筑中部回风的回水系统、电气控制系统等组成。在盐水供水系统中,利用水泵⑭将低位浓盐水箱⑬中的浓盐水送入高位浓盐水箱⑦,调配水箱⑨将浓盐水箱⑦中的浓盐水和回收盐水调配成所需的盐水浓度,送到供水箱,并通过柱状模拟下送风口③供入大空间环境模拟室⑤;在回水系统中,回水盐溶液通过模拟回风口②进入回水箱⑩,利用 PID 控制器⑮将回水箱⑩中的回水与高浓度盐溶液⑦在调配水箱⑨中混合均匀,达到送水盐溶液的浓度要求;在清水系统中,将清水箱①的清水通过④进入模拟室,以此模拟热源;电气控制系统包括电柜⑥及电动执行阀等附属装置,电柜⑥通过各按钮方便控制各管路水泵启停和频率调节。其中,⑧为模拟回风口所影响的区域,即为 PIV 系统的拍摄区域(约为 80 mm × 50 mm),该区域位于回风口中心截面、从短边墙面向外开始。图 2 为液态模型外观图。



①清水箱; ②模型回风口(向下); ③柱状下送风口; ④分水器;
⑤大空间环境模拟室; ⑥电柜; ⑦高位浓盐水箱; ⑧PIV 拍摄区域;
⑨调配水箱; ⑩回水箱; ⑪供水箱; ⑫流量计; ⑬低位浓盐水箱;
⑭水泵; ⑮电导率仪; ⑯针型阀; ⑰球阀; ⑱PID 控制器

图 1 液态模型实验台系统示意图

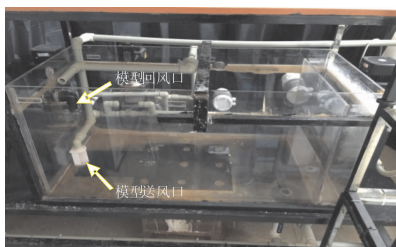


图2 液态模型外观图

2.2 PIV 技术原理

实验中,模拟回风的流场速度矢量场测定采用美国 TSI 公司^[11]生产的 PIV 测试系统。PIV 技术的基本原理是:测量流体流速时,在所需测量的二维平面中均匀散播跟随性、反光性良好的示踪粒子,利用 PIV 系统辅助摄像设备获取示踪粒子的运动图像,通过对运动图像的分析,获得二维流场流速分布。设某一示踪粒子在 t_1 时刻的位置为 (x_1, y_1) , t_2 时刻的位置为 (x_2, y_2) , 则其速度计算原理^[12]如图 3 所示。

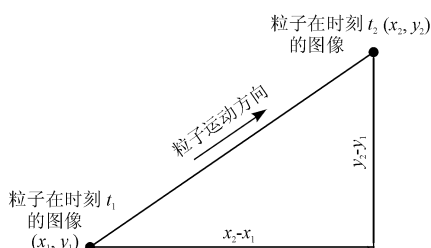


图3 PIV 测速原理图

由此示踪粒子的速度计算公式可表示为:

$$v_x = \frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \bar{v}_x \quad (1)$$

$$v_y = \frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \bar{v}_y \quad (2)$$

式中: v_x 与 v_y 是粒子沿 x 与 y 方向的瞬时速度, m/s; $\bar{v}_x$ 与 $\bar{v}_y$ 是粒子沿 x 与 y 方向的平均速度, m/s; $t_2 - t_1$ 是测量的时间间隔, s。式中, 当 $t_2 - t_1$ 足够小时, $\bar{v}_x$ 与 $\bar{v}_y$ 的大小就可以准确反映 v_x 与 v_y 。PIV 技术就是通过测量示踪粒子的瞬时平均速度以实现对二维流场的测量。

3 二维汇流速度理论公式的修正

不同空间形式和吸入口形状, 空气汇流可分为点汇流、线汇流、自由点汇流等^[1]。忽略回风口贴壁布置对流场的影响, 本文将研究对象原型回风口看作风口圆面上无数线汇源组成, 空间气流集中向一无限长的直线汇集, 然后在这条直线上被吸走。

如图 4 所示为朝下的回风口逆时针转 90° 的回风口坐标系。假设回风口直径为 $2A$, m, 回风流量为 Q , L/min, 取中心截面线汇特征长度 l 为:

$$l = \frac{\pi A^2}{2A} \quad (3)$$

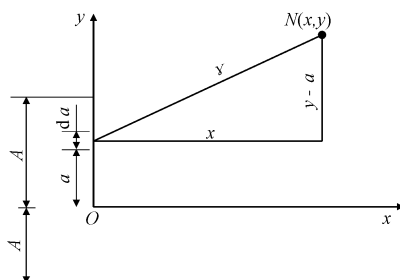


图4 微元线汇流叠加模型图

则单位长度上的回风量 Q' 为:

$$Q' = \frac{Q}{(\pi A^2)/2A} \quad (4)$$

假设回风口气流均匀, 线汇流上微元体 da 的风量为 dQ' , 则有:

$$dQ' = Q' \frac{da}{2A} \quad (5)$$

每一个 da 微元体对任意点 $N(x, y)$ 形成的风速 dv_0 如式(6)所示, 其中 γ 为 N 点与微元体 da 的距离, m/s。

$$dv_0 = \frac{dQ'}{2\pi\gamma} \quad (6)$$

此时 x, y 轴上速度分量为:

$$dv_{x0} = \frac{xQ' da}{4\pi A [x^2 + (y-a)^2]} \quad (7a)$$

$$dv_{y0} = \frac{yQ' da}{4\pi A [x^2 + (y-a)^2]} \quad (7b)$$

微元 da 沿回风口高度进行积分, 回风口对 N 点所形成的风速 x, y 轴分量为:

$$v_{x0} = \frac{Q'}{4\pi A} \left(\arctan \frac{A+y}{x} + \arctan \frac{A-y}{x} \right) \quad (8a)$$

$$v_{y0} = \frac{Q'}{8\pi A} \ln \frac{x^2 + (y+A)^2}{x^2 + (y-A)^2} \quad (8b)$$

由此得到回风口对 N 点所形成的风速 v_0 如式(9)。

式(9)即为二维汇流速度理论式。对一特定的回风口或回水口, 其半径 A 是常数, 而单位长度上的流量 Q' 和某点在二维平面上的坐标 x 和 y 值是变量, 对汇流流场速度分布影响最显著, 为此在变量之前添加 a, b, c 系数修正公式(9)。式(10)即是二维汇流速度半经验公式, 可利用实验数据, 通过规划求

解^[13] 获得修正系数 a 、 b 、 c 。

$$v_0 = \sqrt{\left[\frac{Q'}{4\pi A}\left(\arctan\frac{A+y}{x} + \arctan\frac{A-y}{x}\right)\right]^2 + \left[\frac{Q'}{8\pi A}\ln\left(\frac{x^2 + (y+A)^2}{x^2 + (y-A)^2}\right)\right]^2}$$

(9)

$$v_0 = \sqrt{\left[\frac{aQ'}{4\pi A}\left(\arctan\frac{A+cy}{bx} + \arctan\frac{A-cy}{bx}\right)\right]^2 + \left[\frac{aQ'}{8\pi A}\ln\left(\frac{(bx)^2 + (cy+A)^2}{(bx)^2 + (cy-A)^2}\right)\right]^2}$$

(10)

4 实验工况与结果分析

4.1 实验工况

在液态模型实验中,通过调节水泵频率,获得不同的回水流量,不同的回水流量对应着回水口不同回水速度,并根据公式(4) 计算得到不同回水流量的下的单位长度回水流量,本实验的实验工况如表 1 所示。通过表 1 中的 4 个不同回水流量研究回水汇流特性。

表 1 液态模型实验工况

工况	模型回水 流量 $Q /$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)	模型回水 速度 $v_h /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	模型回水 口的直径 $2A/\text{mm}$	模型单位长度 回水量 $Q' /$ ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	9.23	0.29	26	452.00
2	12.51	0.39		612.62
3	16.32	0.51		799.20
4	19.10	0.60		935.34

4.2 结果分析

实验中,采用 PIV 技术对不同工况拍摄其回水汇流流场,并利用 PIV 相关软件进行数据处理,得到如图 5~8 所示的模型回水口附近流场速度云图。

根据 PIV 技术测试所得的速度云图,便可获得流场各点定量信息。以图 8 中 AB 线段为例选取流场中部分实验速度值及其定位坐标于表 2,根据二维汇流速度理论式(9),计算出相同坐标下的理论速度值,见表 2。

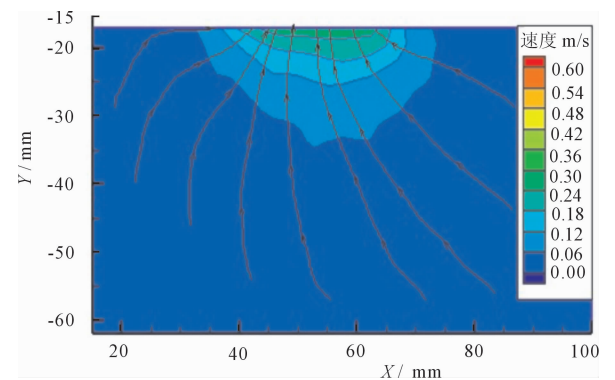


图 5 模型回水流场速度云图(回水速度为 0.29 m/s)

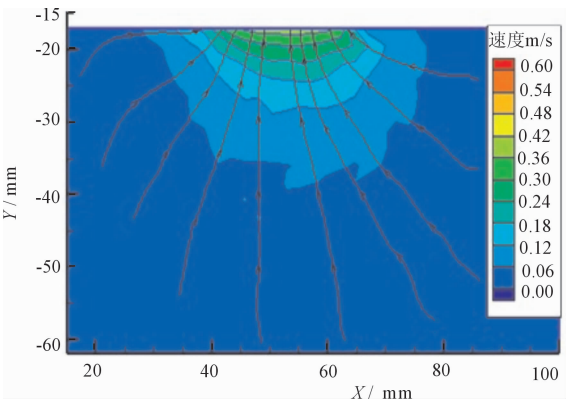


图 6 模型回水流场速度云图(回水速度为 0.39 m/s)

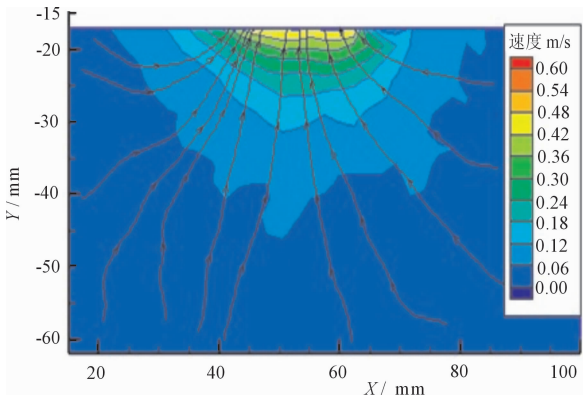


图 7 模型回水流场速度云图(回水速度为 0.51 m/s)

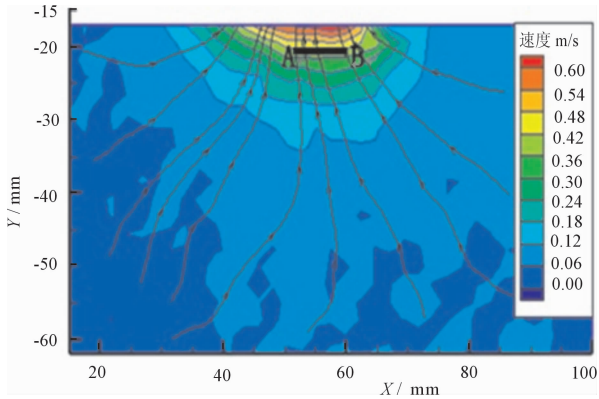


图 8 模型回水流场速度云图(回水速度为 0.60 m/s)

由表 2 可知,实验值与理论值的相对误差 δ 较大,因此采用本文提出的二维汇流速度半经验公式(10),利用实验结果通过规划求解方法,求得回水速度 0.60 m/s 工况的修正系数 $a = 2.0030$ 、 $b =$

2.5984、 $c = 1.6900$,利用半经验公式(10)求出这些坐标点的修正后的理论速度值列于表 2,此时修正后的偏差大大减小,其中相对误差是以各点的计算值与实验值对比求得,从中获得最大相对误差和平均相对误差,求解中摒弃了小于 20% 回水速度的流场实验值。采用同样方法,对本文进行的 4 个不同回水速度工况分别求出修正系数 a 、 b 、 c ,如表 3 所示。表 3 中还列出了各工况整个流场的修正理论值与实验值的最大相对误差和平均相对误差。

表 2 模型回风速度 0.60 m/s 时汇流流场的实验速度值和理论速度值比较

X 轴坐标/mm	Y 轴坐标/mm	实验速度值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	理论速度值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差 δ /%	修正后的理论速度值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	修正后相对误差 δ' /%
48.074	-19.483	0.385	0.269	29.98	0.433	12.38
50.435	-19.483	0.439	0.266	39.24	0.440	0.30
52.797	-19.483	0.445	0.265	40.32	0.441	0.85
55.158	-19.483	0.442	0.266	39.69	0.440	0.44
57.52	-19.483	0.459	0.269	41.28	0.433	5.76
59.881	-19.483	0.451	0.275	38.92	0.403	10.46
62.243	-19.483	0.404	0.282	30.05	0.340	15.81

表 3 回水流场中各工况下的修正系数

模型回水速度 v_h / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	修正系数 a	修正系数 b	修正系数 c	最大相对误差/%	平均相对误差%
0.29	1.936	2.215	1.566	30.1	9.6
0.39	1.998	2.336	1.664	29.4	8.8
0.51	1.989	2.499	1.643	28.9	11.1
0.60	2.003	2.598	1.690	30.7	12.4
综合工况修正系数	1.982	2.412	1.641	30.7	8.5

由表 3 可知,随着模型回水速度 v_h 的增大,修正系数 a 、 b 、 c 值基本呈略增趋势,但基本可作为常数处理。为此,表 3 还列出各修正系数的平均值,其最大误差为 30.7%,平均误差为 8.5%。因此本文所提出的半经验公式(10)适合回水速度 v_h 为 0.2 ~ 0.6 m/s 的范围内。

研究回水速度 v_h 为 0.2 ~ 0.6 m/s 的回水流场,即是研究原型建筑中回风速度 v_h 为 0.9 ~ 2.8 m/s 的回风流场。由公式(10)可知,利用盐水模型实验几何比例尺和速度比例尺代入公式(10)获得原型半经验公式时,比例尺均可抵消,因此模型实验所得汇流流场半经验公式修正系数与原型建筑回风汇流流场修

正系数相等。由此论文通过盐水缩尺模型获得了大空间下送中回分层空调回风汇流流场半经验公式。

5 结 论

(1)本文利用 PIV 系统拍摄液态模型实验中的回水流场,可以直观地看到汇流流场特性,并精确地获得汇流流场的速度矢量值。

(2)利用二维汇流速度理论公式,计算得到汇流流场理论速度值,与 PIV 系统获得的实际速度值存在较大的偏差。通过半经验公式修正后误差大大减少。经本文四个实验工况所得平均修正系数获得的半经验公式,理论值与实验值平均相对误差为 8.5%。

(3)在液态模型中得到的二维汇流速度半经验公式,可以通过速度相似比例尺折算获得适用于大空间建筑回风流场的二维汇流速度半经验公式。

参考文献:

[1] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[2] 秦俊,黄晨,王昕. 大空间盐水实验设计以及下送风冷湖现象实验研究[C]//. 上海市制冷学会 2013 年学术年会论文集,2013.

[3] 王浩,严登华,杨大文,等. 水文学方法研究[M]. 北京:科学出版社,2012.

[4] 孙一坚. 工业通风[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1985.

[5] 彭小勇,李惠敏. 考虑法兰影响的排风罩理论计算方法[J]. 暖通空调,2001,31(4):98-99.

[6] 龙天渝,蔡增基. 流体力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2004.

[7] 王昕. 大空间建筑不同上开口形式室内热环境研究[D]. 上海:上海理工大学,2004.

[8] 张和平. 火灾烟气运动盐水实验模拟和受限空间初起火灾烟气运动特性的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,1996.

[9] 许联锋,陈刚,李建中,等. 粒子图像测速技术研究进展[J]. 力学进展,2003,33(4):533-540.

[10] 麻柏坤,张人杰. 受限空间烟气运动的盐水模拟原理[J]. 火灾科学,1994,3(1):52-56.

[11] TSI Incorporated. Insight 3G & 4G user's guide[M]. Shoreview, Minnesota, USA: TSI Incorporated, 2011.

[12] 陈钊,郭永彩,高潮. 三维 PIV 原理及其实现方法[J]. 实验流体力学,2006,20(4):77-82.

[13] 顾运筠. Excel 规划求解的两类应用[J]. 计算机应用与软件,2005,22(1):137-139.