

空间流动影响因子——室内空气污染控制 新概念及其应用*

张寅平** 李晓锋 王新轲 邓伟 钱科

(清华大学建筑技术科学系, 北京 100084)

摘要 提出了空间流动影响因子概念. 藉此概念, 提出了室内优化有机挥发物(VOC)源和人员活动区域布置的方法, 具体为: (i) 在室内流动情况确定后, 对给定的污染源, 利用空间流动影响因子可方便确定使房间或特定区域污染物浓度最小的污染源的最优布置方式; (ii) 在给定污染源位置的情况下, 利用空间流动影响因子可方便确定使室内特定区域污染物浓度最小的气流组织形式(空调送风形式); (iii) 空间流动影响因子本身, 提供了流场污染危险性或免疫性的评价指标. 通过算例, 介绍了此方法在室内空气污染控制中的应用.

关键词 室内空气品质 有机挥发物 空气净化 位置优化 流场特性

室内空气污染及由此引起的“病态建筑综合症”是当前国际上的普遍问题, 也日益成为我国社会关注的焦点问题. 目前, 我国室内的主要污染问题是化学污染, 主要源于室内建材有机挥发物的大量散发. 这些污染物以分子状态存在于空气中, 随空气运动, 降低了室内空气品质, 对人们的舒适、健康和工作效率造成了负面影响. 室内空气污染控制途径一般可概括为以下三种: 源头控制、通风控制和空气净化, 而对空气污染的控制必须凸现以人为本的思想. 如何利用以人为本的思想同时优化源头控制、通风控制和空气净化以实现室内人员活动区空气的高品质, 是室内空气污染控制领域重要的研究课题.

目前, 一些研究者对通风和气流组织对室内空气品质的影响开展了大量研究. Sandberg等人提出了空气年龄概念, 空气空间某点的空气年龄为离开送风口到达该点的空气微团中所有分子所用的平均时间, 它的大小被用来表征空气的新鲜程度和排污能力: 某点的空气年龄越小, 说明该点的空气越新鲜, 空气品质

收稿日期: 2004-06-08; 接受日期: 2005-09-10

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 50478012 和 50436040)

** E-mail: zhangyp@mail.tsinghua.edu.cn

越好^[1~3]. 一般认为, 理想活塞流的房间换气效果最好, 房间的平均空气年龄 $\bar{\tau}$ 和房间的名义时间常数 τ_n 间存在以下关系¹⁾: $\bar{\tau} = \frac{\tau_n}{2}$, 其中, τ_n 为 V (房间体积, m^3)/ Q (房间通风换气量, m^3/s). 在实际房间中, 换气效率 ε 被定义为新鲜空气置换原有空气的快慢与活塞通风下置换快慢的比例^[3], $\varepsilon = \frac{\tau_n}{2\bar{\tau}}$, 可以看出, 在风口送新鲜空气且污染物散发源均匀布置的前提下, 换气效率表征了整个房间送风的有效性: 平均空气年龄小, 换气效率高, 送风去除污染物的能力就强. 在活塞流情况下, 换气效率为 100%, 理想的混合通风换气效率为 50%. 当送风来自多个风口时, 为了区分它们各自的作用, Kato 等人于 1994 年提出了 SAV4 指标^[4], 它反映了稳态情况下风口送风对房间任一点空气品质的贡献. Yang 等人提出了送风可及性和污染可及性指标, 从空间和时间两个角度描述了送风和污染物对室内空气品质的影响情况, 为洁净空气的送入、污染物有效排除等提供了理论指导^[5]. 但上述研究在以下方面存在一些不足: 空气年龄、换气效率、SAV4 指标、送风可及性和污染可及性等难以对室内 VOC 源、汇和人员活动区域布置方便地进行优化, 难以揭示流场的一些本质特征: 不同位置间空气流动的相互影响和流场对污染的免疫度. 此外, 我们认为, 送风可及性和污染物可及性从本质上是一回事, 均反映流场结构和流动次序对送风和污染对空间污染物浓度的影响, 是只与流场有关的物理量, 可以统一. 本文基于实际情况中, 室内空气流场影响浓度场而浓度场不影响流场的特点以及流场的本质特征——流线空间单向特性, 提出了空间流动影响因子概念, 用于分析流场的流动次序和结构, 发展了室内稳态流场情况下利用此概念优化流动、VOC 源和人员活动区域布置的方法, 具体为: (i) 在给定流动情况下, 确定使房间或特定区域污染物浓度最小的污染源的最优布置; (ii) 在给定污染源情况下, 优化气流组织; (iii) 给出评价流场污染危险性或免疫性判据的方法. 通过算例, 说明了此方法的应用.

1 稳态问题空间流动影响因子的引入及其物理意义

当室内边界处或空气中存在污染源时(室内送风中存在污染也可当做室内边界处的污染), 污染物浓度达到稳态后满足以下浓度方程:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} C_a - \Gamma_a \nabla C_a) = S_i, \quad (1)$$

其中, $\mathbf{v}$ 是速度矢量; S_i 是第 i 个污染源的污染强度密度 ($i = 1, 2, 3, \dots$), 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$; C_a 和 Γ_a 分别是污染物浓度和污染物在空气中的扩散系数, 对层流或静止流体中的扩散系数; Γ_a 为污染物在空气中的层流扩散系数 D_a , 对湍流, Γ_a 为有效扩散系数(即层流扩散系数加湍流扩散系数), 其表达式为^[6]

1) 杨建荣. 送风有效性和污染物扩散特性的研究与应用. 清华大学博士论文, 2004

$$\Gamma_a = D_a + \frac{\mu_t}{\sigma_c}, \quad (2)$$

其中, μ_t 为湍流黏性系数, σ_c 为与浓度场相关湍流 Plant 数.

由于室内污染物浓度一般不高, 其存在对空气流动的影响可忽略不计. 换言之, 流场会影响浓度场而浓度场不影响流场. 因此, 对给定的室内空间稳定空气流动, 可以看出存在以下关系: (i) C_a 仅是 $\mathbf{v}$ 、扩散系数 Γ_a 和 S_i 的函数, 对室内空间中常见的湍流流动, 有效扩散系数 Γ_a 中湍流扩散系数远大于层流扩散系数, 因此, 可近似认为 Γ_a 只与流动状态有关; (ii) 浓度场与 S_i 呈线性关系, 满足叠加原理, 即

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v} C_a - \Gamma_a \nabla C_a) = \sum S_i \quad (3)$$

成立.

边界条件为

$$S_j = C_j \quad (C_j \text{ 为常数}, j=1, 2, \dots).$$

注意, 这里, 室内和边界上的污染源假设为恒流源, 这对大多数建材散发的有机挥发物污染是成立的, 参见文献[7~10]和附录 A.

设空间中污染源的位置为 $M(x, y, z)$, 所关心的目标位置 $M(x_0, y_0, z_0)$, 则有

$$C_a(x_0, y_0, z_0) = \int_V B_{M_0 M}(x_0, y_0, z_0, x, y, z) S_i dv. \quad (4)$$

显然, $B_{M_0 M}(x_0, y_0, z_0, x, y, z)$ 是流场、污染物物性、污染源和目标位置的函数. 对给定的污染物, 它仅是流场、污染源和目标位置的函数, 反映了由于流动, 源位置(M)对目标位置(M_0)的一种影响, 为此, 我们定义 $B_{M_0 M}(x_0, y_0, z_0, x, y, z)$ 为 M 对 M_0 的空间流动影响因子(spatial-flow-influence-factor, 简称 SFIF, 今后用 SFIF 表示 B , SFIF(m, n)表示 n 点对 m 点的影响因子). 它本质上反映的是流场流动结构与次序特征, 由流场惟一确定, 其物理意义可通过活塞流流场的 SFIF 分布一目了然.

如图 1 所示, 将活塞流通道划分为 M 个子空间时, 设污染源在第 i 个小格, 它

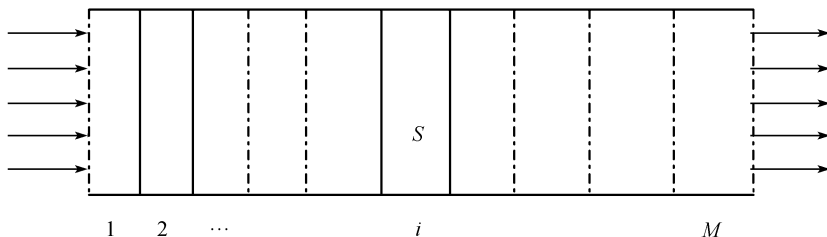


图 1 活塞流流场流动和源位置示意

对上游没有影响, 即 $SFIF(i, k)=0$ ($k=1, 2, \dots, i-1$), S 对下游有影响, 即 $SFIF(k, i) = S/Q$ ($k=i, i+1, \dots, M$), 其中, Q 为活塞流的流量, 单位为 m^3/s .

2 空间流动影响因子(矩阵)的确定方法及特征

对图 1 所示的一维活塞流, 根据空间流动影响因子的定义, 可得出空间流动影响因子矩阵 $SFIF$ 为如下的上三角阵:

$$SFIF = \begin{bmatrix} \frac{1}{Q} & \frac{1}{Q} & \frac{1}{Q} & \dots & \frac{1}{Q} \\ 0 & \frac{1}{Q} & \frac{1}{Q} & \dots & \frac{1}{Q} \\ 0 & 0 & \frac{1}{Q} & \dots & \frac{1}{Q} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{Q} \end{bmatrix}_{m \times m}. \quad (5)$$

对二维或三维流场, 空间流动影响因子矩阵求解较一维复杂, 下面以一般的二维矩形稳态流场为例说明如何求得 $SFIF$. 方法对一般二维和三维稳态流场都适用.

下面通过算例, 说明二维流场 $SFIF$ 的求解.

图 2 为一房间, 高 3 m, 宽 4.5 m, 左侧上方有一条形送风口, 左侧下方有一条形回风口(开口高度均为 0.3 m). 对计算区域进行空间离散, 离散网格数目应保证利用 CFD 方法计算得到的速度场结果与网格划分无关. 将网格按某种排序规则编号, 由此, 可求出空间流动影响因子矩阵 $SFIF$, 具体求解方法见附录 B. 为了说明方便, 采用 10×10 网格, 编号后共有 100 个网格(如图 2(a)中网格按从左到右、从下到上编号, 即编号 $k=10(i-1)+j$, $i=1, 2, \dots, 10$, $j=1, 2, \dots, 10$). i 和 j 表示原二维空间中的网格编号, 用 CFD 方法求得速度分布, 见图 2(b). 在实际应用中, 网格划分应足够细致, 以保证网格数目对计算结果的影响可忽略.

此例的空间流动影响因子矩阵见表 1.

空间流动影响因子矩阵有如下特点: (i) $A_{ij, i'j'}$ 所在行元素 $A_{ij, 11}, A_{ij, 12}, \dots, A_{ij, mn}$ 表示 (i, j) 网格受空间各单元的影响因子; (ii) $A_{ij, i'j'}$ 所在列元素 $A_{11, i'j'}, A_{12, i'j'}, \dots, A_{mn, i'j'}$ 表示 (i', j') 网格对空间各单元的影响因子; (iii) 主对角线上元素最大, 表明每一网格单元流体流动对自己影响最大; (iv) 送风口($i=10, j=1$)对各点的空间流动影响因子均一样(本例中为 0.3785), 表明在稳态流动场, 若只有送风口有污染源, 经过足够长时间, 浓度场达到稳态时, 整个空间污染物浓度均匀; (v) 送风口受各点的影响最小; (vi) 排风口($i=1, j=1$)受各点的空间流动影响因子均一样

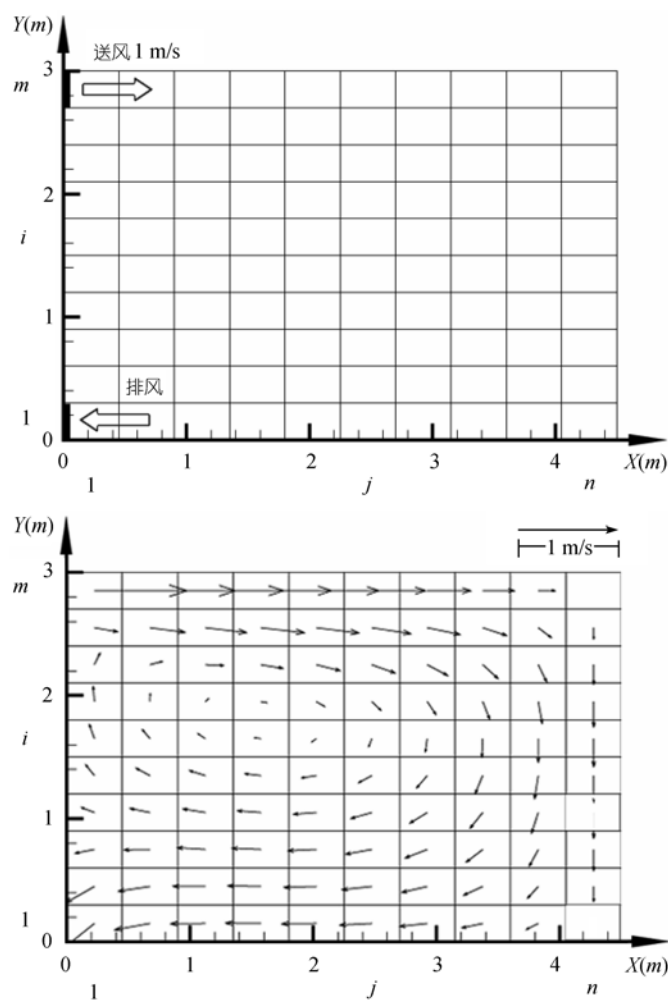


图 2 二维流场速度、尺寸和网格划分示意图
(a) 二维流场送风、尺寸和网格划分示意图, (b) 速度场示意图

表 1 10×10 网格的上送同侧下回流场的 $SFIF$ 矩阵

网格编号	1	2	3	...	95	96	97	98	99	100
1	0.3785	0.3785	0.3785	...	0.3785	0.3785	0.3785	0.3785	0.3785	0.3785
2	0.0722	0.5432	0.4605	...	0.3854	0.3867	0.3878	0.3886	0.3893	0.3896
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
95	0.0105	0.0310	0.0470	...	0.5393	0.0852	0.0837	0.0826	0.0820	0.0817
96	0.0116	0.0341	0.0518	...	0.5009	0.5995	0.0952	0.0937	0.0928	0.0924
97	0.0122	0.0361	0.0550	...	0.4771	0.5499	0.6818	0.1022	0.1008	0.1003
98	0.0126	0.0374	0.0570	...	0.4627	0.5202	0.6182	0.8094	0.1087	0.1072
99	0.0129	0.0382	0.0583	...	0.4536	0.5017	0.5793	0.7187	1.0304	0.3106
100	0.0131	0.0387	0.0590	...	0.4489	0.4922	0.5597	0.6743	0.9062	1.5200

(本例中为 0.3785), 表明在稳态流动场, 无论源的位置如何, 只要其强度相同, 则稳态时排风口的污染物浓度相同.

在得到了离散流场空间流动影响因子矩阵后, 离散流场的流动结构和次序特征就一目了然了. 可以说, 空间流动影响因子矩阵是空间流场的“全息”矩阵, 利用该矩阵可了解流场的各种信息, 如: 空气年龄^[1~3]、换气效率¹⁾、送风可及性和污染可及性^[5]及 CPR1^[10], 详见后节.

因此, 在得到空间流动影响因子矩阵后, 可很方便地进行室内污染源和人员区布置的优化, 并为气流组织的优化提供了有力手段.

3 空间关注度密度函数和空间区域关注度

杨建荣文¹⁾引入“空间占用密度”概念, 以区分控制不同空间区域污染的重要性: 在空间中, 若某个室内人员(用 i 表征)停留总时间为 T_i , 而该使用者在空间某区域 $zone_j$ 处的停留时间为 $t_i(zone_j)$, 则此区域内使用者 i 的占用密度可表达如下:

$$OD_i(zone_j) = \frac{t_i(zone_j)}{T_i}. \quad (6)$$

若对于房间内的所有人群定义, 房间的占用密度 OD 可表达如下:

$$OD(zone_j) = \frac{\sum_{i=1}^K OD_i(zone_j)}{K}, \quad (7)$$

其中, K 为房间内的总人数.

我们认为, 空间占用密度是对空间区别对待的一种很好的方式, 但不够全面. 譬如, 有些区域, 虽然没有人员, 但也需要较高的洁净度, 有些区域, 由于人员的情况不同, 对空间的洁净要求也不一样. 如何表示这些因素对空间洁净要求的影响呢? 本文定义了空间关注度密度函数 $R(x, y, z)$, 它反映从空气品质角度对空间中各点的关注程度, 可以是空间连续分布函数, 可以是空间按区域分段函数, 且满足以下关系:

$$\int_V R(x, y, z) dv = 1. \quad (8)$$

对空间离散网格或区域, 可采用空间权重密度函数的离散形式 $R_i(x, y, z)$ ($i=1, 2, 3, \dots$), $R_i(x, y, z)$ 满足以下关系:

$$\sum_{i=1} R_i(x, y, z) = 1. \quad (8a)$$

$R(x, y, z)$ 或 $R_i(x, y, z)$ 的具体形式可视具体问题而定.

1) 见 52 页脚注

对给定的空间区域 Ω , 对其的空间区域关注度可用下式得到:

$$R_{\Omega} = \int_{\Omega} R(x, y, z) dv, \quad (9)$$

对空间离散网格或区域, R_{Ω} 可表示如下:

$$R_{\Omega} = \sum_{i \in \Omega} R_i(x, y, z). \quad (10)$$

4 应用举例

4.1 确定传统流场特性评价参数

4.1.1 利用空间流动影响因子确定流场各点的空气年龄

空气年龄的控制方程如下^[11]:

$$\nabla(\rho \mathbf{v} \cdot \tau_p - \Gamma_A \nabla \tau_p) = \rho. \quad (11)$$

比较方程(1)和(11)可知, 当浓度控制方程中的源项恒为密度 ρ 时, 它就和空气龄控制方程完全相同, 故有

$$\tau_p(x_0, y_0, z_0) = \int_V SFIF_p(x_0, y_0, z_0, x, y, z) \rho(x, y, z) dv. \quad (12)$$

其离散形式为

$$\tau_{i,j} = \sum_{j=1}^{m \times n} SFIF(i, j) \times \rho. \quad (12a)$$

4.1.2 利用空间流动影响因子确定换气效率

$$\varepsilon = \frac{V^2}{2Q} \int_V \left[\int_V SFIF_p(x_0, y_0, z_0, x, y, z) \rho(x, y, z) dv \right] dv, \quad (13)$$

其离散形式为

$$\varepsilon = \frac{V^2}{2Q} \sum_{i=1}^{m \times n} \sum_{j=1}^{m \times n} SFIF(i, j) \times \rho_j. \quad (13a)$$

4.1.3 与送风和污染源可及性的关系

文献[5]定义了送风可及性 $A_{s,i}$ 和污染物可及性 $A_{c,i}$ 并导出, 对稳态流动和浓度场, 室内任意点浓度用可及性表示:

$$C = \sum_{i=1}^M C_{in,i} A_{s,i} + \sum_{j=1}^N \frac{S_j}{Q} A_{c,j}. \quad (14)$$

比较方程(3)和方程(11)可以看出, 空间流动影响因子很好地将送风可及性 $A_{s,i}$ 和污染物可及性 $A_{c,i}$ 统一描述了.

4.1.4 与污染因子的关系

文献[12]引入 $CPR1$ 概念, 以表征空间某一位置 M_0 受某一污染源散发污染 M 的份额:

$$CPR1 = \frac{q_i}{Q_i}, \quad (15)$$

其中, q_i 为位置 i 处来自某污染源的污染量, Q_i 为该污染源释放的污染量. 利用空间流动影响因子, 以 x_s, y_s, z_s 表示污染源位置坐标, $CPR1$ 可表示为

$$CPR1 = \frac{SFIF_{M_0, M}(x, y, z, x_s, y_s, z_s)}{\int_V SFIF_{M_0, M}(x, y, z, x_s, y_s, z_s) dv}, \quad (16)$$

其离散形式为

$$CPR1 = \frac{SFIF_{M_0, M}(x_i, y_j, z_k, x, y, z)}{\sum_{i=1, j=1, k=1}^{m, n, l} SFIF_{M_0, M}(x_i, y_j, z_k, x, y, z)}. \quad (16a)$$

4.2 在给定流动情况下, 确定污染源和人员活动区的最优布置

当空间流场确定后, 对应的空间流动影响因子也就确定了. 藉空间流动影响因子, 可方便地确定污染源和人员活动区的最优布置.

4.2.1 污染源位置给定, 确定最佳人员活动区位置

室内污染源位置给定时, 假定污染源位置为 M , 人员活动区位置为 M_o . 则 M_o 应选在使空间流动影响因子 $SFIF(M_o, M)$ 最小的位置上. 若人员活动区有限制(如人只能呆在地面上的某一特定区域), 则 M_o 应选所在可能区域内使空间流动影响因子 $SFIF(M_o, M)$ 最小的位置上.

仍以图 2 显示的情况为例, 假设地面上($i=1, j=5$)点有 1 污染源, 表 2 为该点对空间各点的空间流动影响因子. 从中可以看出, 人的位置应靠右墙, 至少人应在污染源右侧(即人尽量在污染源的“上游”). 图 3 显示了污染源对房间下半部分($i=1 \sim 5$)不同区域($j=1, 2, \dots, 10$)的平均影响因子, 可以看出, 人在污染源左侧污染物吸入量是人在污染源右侧时的 3 倍之多.

4.2.2 人员活动区位置给定, 确定最佳污染源位置

仍以图 2 显示的情况为例, 假设地面上($i=5, j=5$)点为人呼吸区域, 表 3 为空间各点对该点的空间流动影响因子. 从中可以看出: 地面污染源(譬如吸附了大量有机挥发物的地毯)应尽量布置在地面左侧(即人的“下游”), 且尽量远离人的呼吸区, 布置在地板右侧对人的污染是左侧的 20 余倍; 计算机、打印机或家具类

污染源也应尽量布置在人的左侧, 且尽量远离人的呼吸区, 污染源在人右侧对人的影响比其在人左侧时明显要高。

应用中, 参照此例, 根据人的位置、污染源的功能和性质, 参照空间流动影响因子, 可方便地定出人和污染源的最佳位置。

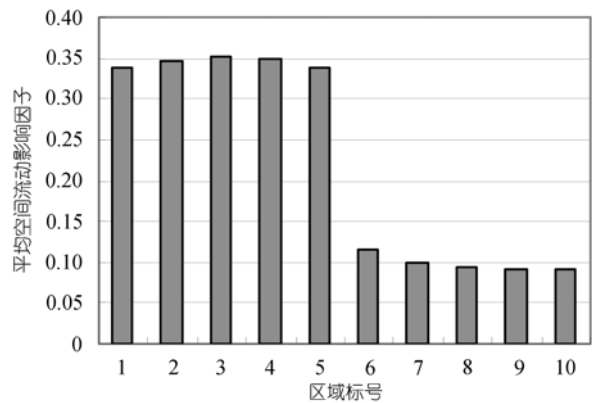


图 3 污染源对房间下半部分不同区域的平均影响因子

表 2 点(1, 5)对空间各点的空间流动影响因子

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0.0099	0.026	0.0421	0.0557	0.0662	0.0737	0.0786	0.0818	0.0839	0.085
9	0.1815	0.1549	0.1347	0.1198	0.1086	0.1002	0.094	0.0897	0.0869	0.086
8	0.2333	0.2120	0.1861	0.1603	0.1373	0.1192	0.1058	0.096	0.0898	0.0872
7	0.2606	0.2430	0.2149	0.1817	0.1507	0.1268	0.1106	0.0991	0.0917	0.0884
6	0.2798	0.2641	0.2347	0.1946	0.1547	0.1257	0.1096	0.0993	0.0926	0.0893
5	0.2979	0.2850	0.2567	0.2107	0.1590	0.1205	0.1058	0.0979	0.0927	0.0901
4	0.3173	0.3109	0.2896	0.2430	0.1768	0.1153	0.1018	0.0961	0.0926	0.0907
3	0.3386	0.3441	0.3395	0.3071	0.2313	0.1122	0.0987	0.0946	0.0924	0.0912
2	0.3604	0.3817	0.4046	0.4180	0.3757	0.1116	0.0968	0.0937	0.0922	0.0915
1	0.3784	0.4106	0.4622	0.5598	0.7425	0.1125	0.0959	0.0933	0.0922	0.0917

表 3 空间各点对点(5, 5)的空间流动影响因子

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0.3785	0.3791	0.3778	0.3720	0.3599	0.3426	0.3271	0.3154	0.3074	0.3040
9	0.3732	0.3853	0.3985	0.4074	0.4021	0.3738	0.3456	0.3239	0.3096	0.3035
8	0.3590	0.3701	0.3962	0.4362	0.4678	0.4277	0.3776	0.3382	0.3136	0.3024
7	0.3330	0.3414	0.3714	0.4389	0.5429	0.4931	0.4159	0.3550	0.3171	0.3000
6	0.2933	0.3000	0.3287	0.4158	0.6579	0.5562	0.4435	0.3636	0.3165	0.2958
5	0.2385	0.2461	0.2723	0.3653	0.9107	0.5857	0.4375	0.3546	0.3094	0.2897
4	0.1725	0.1844	0.2086	0.2687	0.4897	0.4432	0.3763	0.3262	0.2963	0.2828
3	0.1059	0.1249	0.1505	0.1912	0.2938	0.3182	0.3089	0.2935	0.2820	0.2762
2	0.0517	0.0787	0.1075	0.1398	0.1989	0.2396	0.2598	0.2680	0.2706	0.2712
1	0.0177	0.0535	0.0847	0.1143	0.1590	0.2028	0.2348	0.2543	0.2645	0.2685

4.3 考虑空间区域具有不同空间关注度时污染源的优化布置

对一个给定的流场, 可得 $SFIF$ 矩阵. N 个给定污染源($s_1, s_2, \dots, s_N$)的某种放置方式(设为方式 j), 对应于空间的一个源分布列向量 S_j , 相应的空间浓度场 C 可表述如下:

$$C = SFIF \times S_j. \quad (17)$$

考虑空间区域具有不同空间关注度时污染源源分布优化布置问题的数学描述为: 已知空间关注度函数 R 或空间区域关注度, 寻求使 $R \times (SFIF \times S_j)$ 取最小值的源分布列向量 S_j (元素给定, 排列次序可变). 即求满足下式的 S_j 列向量: $\min(R \times C) = \min(R \times (SFIF \times S_j))$, R 是一个行向量, 表示各点的空间关注度.

数学上有以下排序定理: 设 $2N$ 个非负实数 $a_1, a_2, \dots, a_N$ 及 $b_1, b_2, \dots, b_N$ 满足 $a_1 \leq a_2 \leq \dots \leq a_N$ 及 $b_1 \leq b_2 \leq \dots \leq b_N$, 则对 $1, 2, \dots, N$ 种任一不重复全排列 $k_1, k_2, \dots, k_n$, 均有

$$\sum_{i=1}^N a_i b_{N+1-i} \leq \sum_{i=1}^N a_i b_{k_i} \leq \sum_{i=1}^N a_i b_i.$$

$R \times SFIF = R \times [A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_N]_N$ 是一行向量, S 是一列向量. 由排序定理可知: 使 S 列向量中元素与 $R \times SFIF$ 中行向量中元素按大小呈逆序排列, 则可使 $R \times SFIF \times S$ 最小.

仍以上述流场为例, 说明上述方法的应用. 假定空间中存在应关注的两个区域分别为图 4 中 A 与 B 区, 其空间区域关注度分别为 $R_A=3/8$ 和 $R_B=5/8$. 空间其他网格的关注度为 0.

有若干个污染源, 如何放置, 可使两区域以区域关注度为权的污染物浓度最

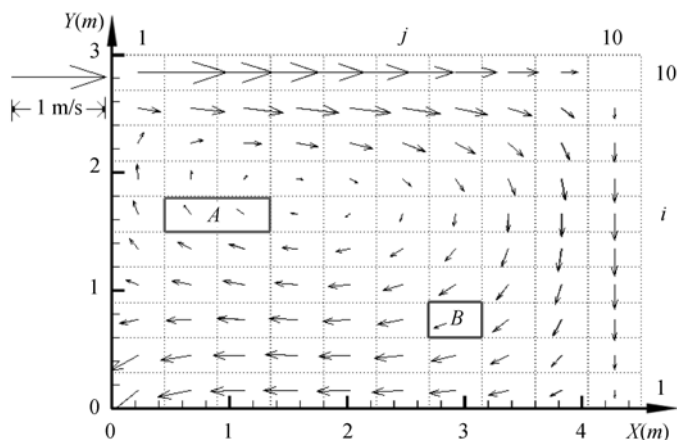


图 4 二维流场及其关注区域示意图

小? 即使 $C=R_A C_A+R_B C_B$ 取最小值.

采用上述方法, 将空间关注度向量与 $SFIF$ 矩阵相乘后, 得到的加权空间流动影响因子矩阵, 由于矩阵为 100×100 , 用表格形式难以表述, 故用图 5 表示.

可以看出, 排风口处的加权空间流动影响因子最小, 因此污染源放置于出口附近最优. 放置于 A 区附近稍优于放置 B 区附近. 如果污染源仅存在于 $y=0.8 \text{ m}$ 平面上(即 $i=3$)时, 污染源放置在该平面各点($j=1, 2, \cdots, 10$)的加权空间流动影响因子如图 6 所示.

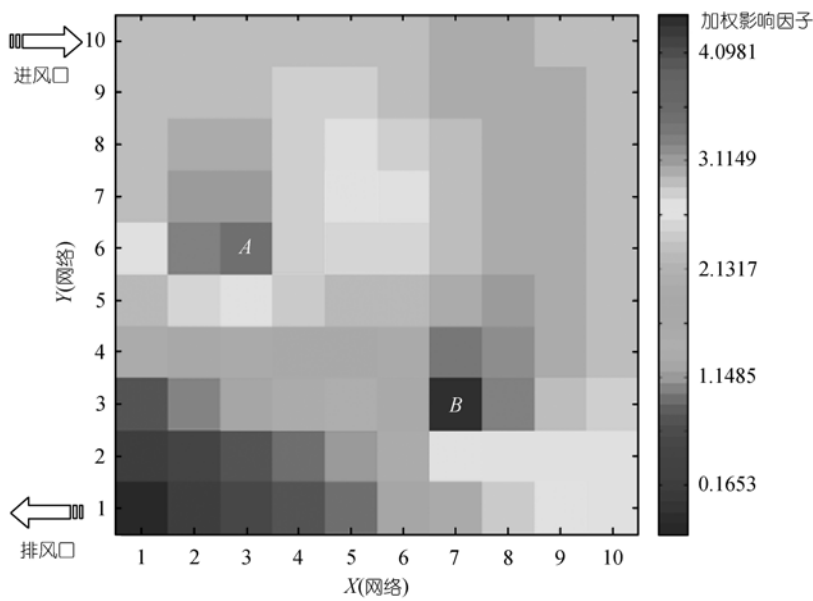


图 5 加权空间流动影响因子示意图

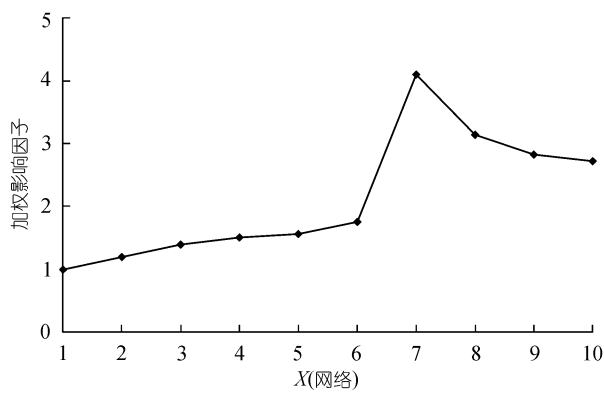


图 6 $i=3$ 平面各点加权空间流动影响因子

可以看出,在此高度处,源放在最左侧最好. 因此,在空间关注程度确定时,利用 *SFIF* 矩阵可以迅速求解出加权空间流动影响因子矩阵,从而确定源的最优分布:源应按其强度从大到小的顺序放置在加权空间流动影响因子从小到大排列的区域上.

4.4 在给定污染源和人员活动区位置情况下,评判气流组织

仍以前述空间为例,分别用 CFD 软件 PHOENICS 模拟 3 种工况:等温送风方式为上送同侧下回、上送异侧上回和上送异侧下回,流场和计算出的 *SFIF* 矩阵如图 7~9.

如图 10,假定污染源位于 $A(2, 6)$ 和 $B(9, 6)$ 处,人呼吸区在 $C(6, 6)$ 处,3 种工

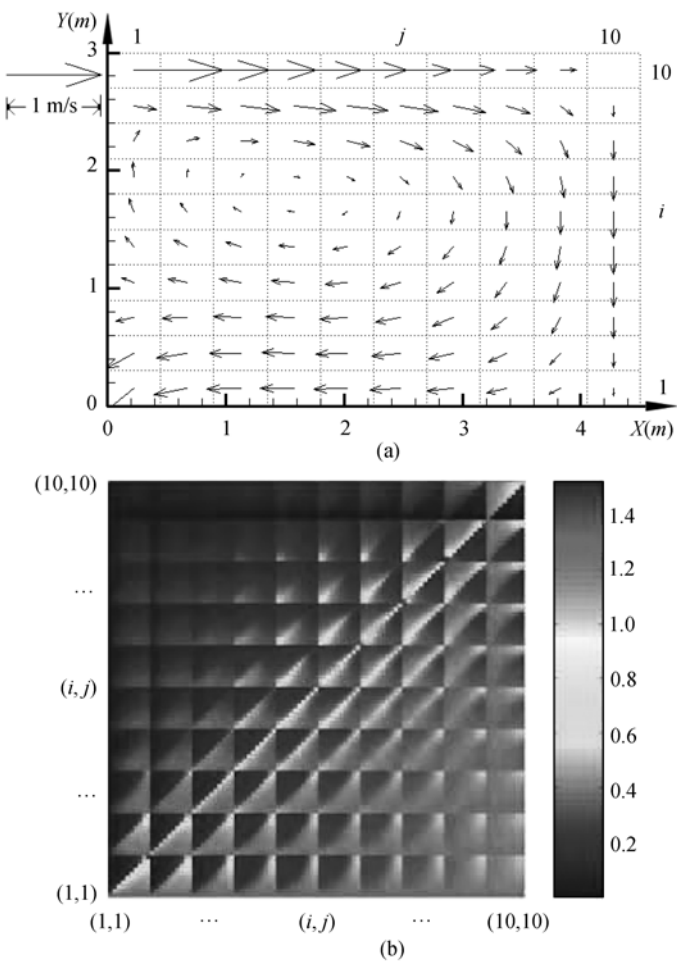


图 7 上送同侧下回
(a) 流场示意图, (b) *SFIF* 矩阵图

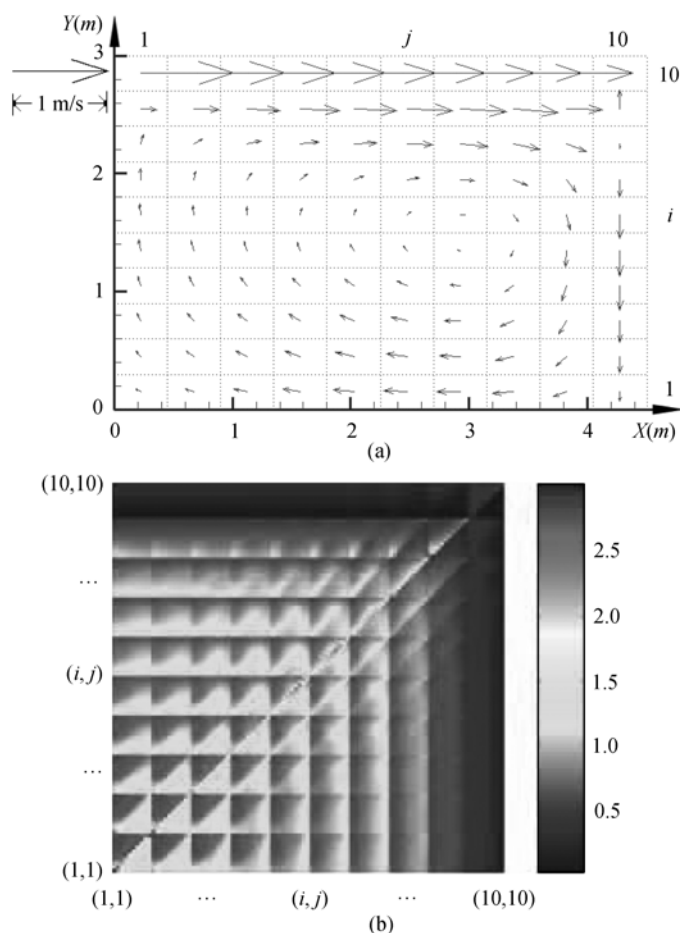


图 8 上送异侧上回
(a) 流场示意图, (b) $SFIF$ 矩阵图

况下 A 和 B 点对 C 点的影响因子分别为: 上送同侧下回: $SFIF(C, A) = 2.172$, $SFIF(C, B) = 1.917$; 上送异侧上回: $SFIF(C, A) = 5.332$, $SFIF(C, B) = 8.225$; 上送异侧下回: $SFIF(C, A) = 4.837$, $SFIF(C, B) = 3.471$. 可见, 上送同侧下回的送风方式最理想, 上送异侧上回最差. 源位于 A 时, 3 种送风方式下源对人员呼吸区的影响因子差别较小. 源位于 B 时, 3 种送风方式差别明显. 利用 $SFIF$ 矩阵可方便地在源、人位置关系基本确定时优选送风方式.

4.5 流场污染危险性或免疫性判断

在一些恐怖活动中, 有毒化学物质往往从一些特殊位置 (如新风口) 放入, 如何评价流场对不同位置的污染造成的污染危险性和免疫性是值得关注的问题.

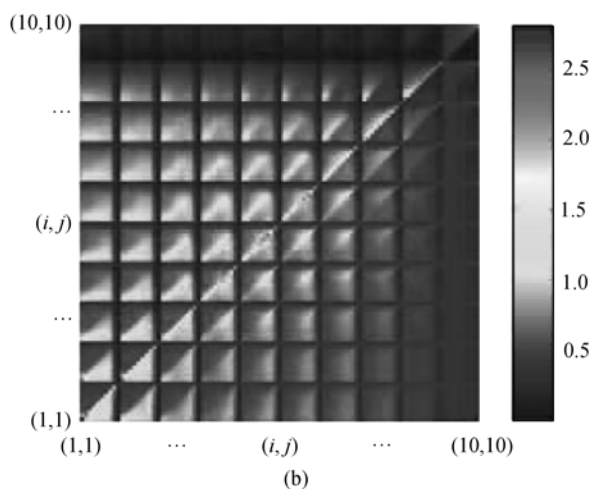
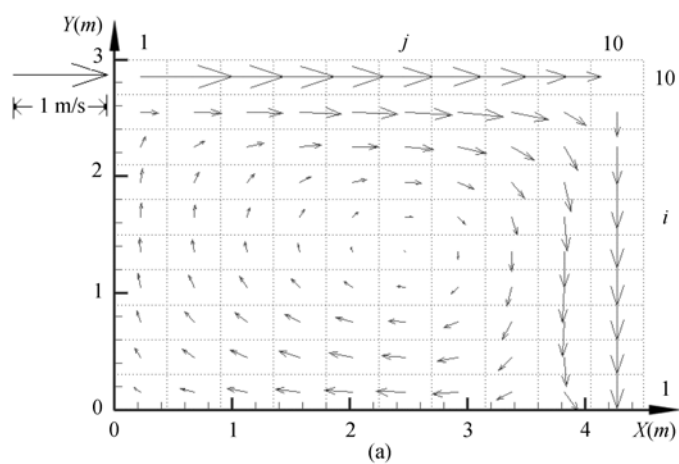


图 9 上送异侧下回
(a) 流场示意图, (b) *SFIF* 矩阵图

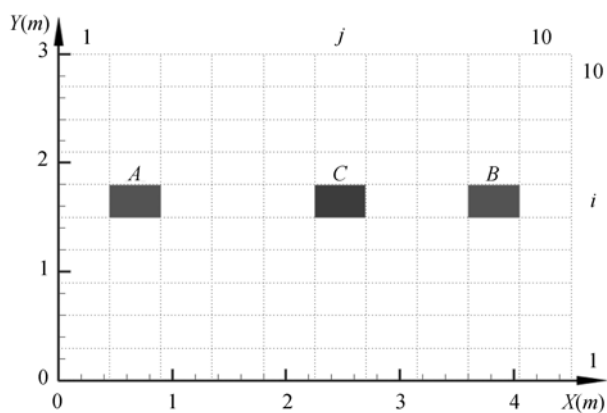


图 10 源和人位置

利用空间流动影响因子对此可做出评价。

5 结论

本文提出的空间流动影响因子概念,深化了对流场结构和流动次序的认识,为室内污染控制提供了新概念、新角度和新方法。

藉此概念,在送风方式一定的情况下,可方便地对室内优化有机挥发物(VOC)源和人员活动区域布置进行优化;在给定污染源和目标位置的情况下,利用空间流动影响因子可方便确定使房间或特定区域污染物浓度最小的气流组织形式(空调送风形式)。

空间流动影响因子本身提供了流场污染危险性或免疫性的评价指标。

该方法可进一步发展,如:考虑污染汇的分布与优化,发展基于该方法地区域或网络模型,拓宽到稳态流场非稳态浓度场,并在实际室内空气污染控制中发挥作用。这是近期值得研究的问题,我们希望感兴趣的研究者能致力于上述问题的研究,当然,我们自己也将继续努力。

参 考 文 献

- 1 Sandberg M. What is ventilation efficiency? Building and Environment, 1981, 16: 123~135[DOI]
- 2 Sandberg M. Ventilation efficiency as a guide to design. ASHRAE Transaction, 1983, 89(2B): 455~479
- 3 Sandberg M, Sjoberg M. The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms. Building and Environment, 1983, 18(4): 181~197[DOI]
- 4 Kato S, Murakami S, Kobayashi H. New scales for evaluating ventilation of contaminant. In: Proc of the 12th Inter Symposium on Contamination Control. The Japan Air Cleaning Association, Japan, 1994. 341~348
- 5 Yang J R, Li X T, Zhao B. Prediction of transient contaminant dispersion and ventilation performance using the concept of accessibility. Energy and Buildings, 2004, 36(3): 293~299[DOI]
- 6 陶文铨. 数值传热学. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2002. 5, 349
- 7 Xu Y, Zhang Y P. An improved mass transfer based model for analyzing VOC emissions from building materials. Atmospheric Environment, 2003, 37(18): 2497~2505[DOI]
- 8 Xu Y, Zhang Y P. A general model for analyzing VOC emission characteristics from building materials and its application. Atmospheric Environment, 2004, 38(1): 113~119[DOI]
- 9 Zhang Y P, Xu Ying. Characteristics and correlations of VOC emissions from building materials. Inter J of Heat and Mass Transfer, 200, 46(25): 4877~4883
- 10 Huang H, Haghighat F. Modeling of volatile organic compounds emission from dry building materials. Building and Environment, 2002, 37: 1349~1360[DOI]
- 11 李先庭, 江 亿. 用计算流体力学方法求解通风房间的空气年龄. 清华大学学报(自然科学版), 1998, (05): 28~31
- 12 伊藤秀一, 加藤秀介, 村上周三. 換気効率指標の数値解析検証用の2次元室内気流実験不完全混合室内の居住域換気効率の評価に関する研究. 日本建築学会計画系論文集, 2000, 543: 49~56

附录 A 建材中有机挥发物(VOCs)散发特性分析

一般室内的建材中VOCs散发可视为一维单面散发, 基于传质理论的单层材料散发的物理模型^[7]如下所示:

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2}, \quad (\text{a1})$$

$$\frac{\partial C_m}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad (\text{a2})$$

$$-D_m \frac{\partial C_m}{\partial x} = h_m \left(\frac{C_m}{K} - C_a \right), \quad x = \delta, \quad (\text{a3})$$

$$C(x, t) = C_0, \quad t = 0, \quad 0 \leq x \leq \delta, \quad (\text{a4})$$

式中, C_m 为材料内有机挥发物的浓度, 单位 kg/m^3 ; t 为时间, 单位 s ; x 为材料在扩散方向的坐标, 单位 m ; D_m 为材料内有机挥发物的扩散系数, 单位 m^2/s ; h_m 为材料表面处的对流传质系数, 单位 m/s ; C_a 为房间内有机挥发物的浓度, 单位 kg/m^3 ; K 为材料与空气界面处的有机挥发物分离常数; C_0 为材料内 VOC 的初始浓度, 单位 kg/m^3 .

(a3)式表示的是材料的有机挥发物散发速率, 从方程右边可以看出理论上散发速率与室内有机挥发物浓度 C_a 有关. 文献[7~10]表明, 在散发的初始阶段(一般不超过 30 h)以后, C_a 与 C_m/K 相比很小, 可忽略, 说明房间空气中有有机挥发物浓度 C_a 对建材散发率的影响很小. 因此, 本文中将有有机挥发物散发速率视为与室内有机挥发物浓度无关是合理的.

附录 B 空间流动影响因子矩阵求解方法

如图 B1, 与方程(1)对应的二维空间中的浓度控制方程离散形式可以写成

$$a_P C_P = a_E C_E + a_W C_W + a_N C_N + a_S C_S + b, \quad (\text{b1})$$

$$a_E = D_e A(|P_e|) + \max(-F_e, 0), \quad (\text{b2})$$

$$a_W = D_w A(|P_w|) + \max(F_w, 0), \quad (\text{b3})$$

$$a_N = D_n A(|P_n|) + \max(-F_n, 0), \quad (\text{b4})$$

$$a_S = D_s A(|P_s|) + \max(F_s, 0), \quad (\text{b5})$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S, \quad (\text{b6})$$

$$b = S \Delta x \Delta y, \quad (\text{b7})$$

其中, $D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\delta x)_e}$, $F_e = (\rho u)_e \Delta y$, $D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{(\delta x)_w}$, $F_w = (\rho u)_w \Delta y$, $D_n = \frac{\Gamma_n \Delta x}{(\delta y)_n}$, $F_n = (\rho v)_n \Delta x$, $D_s =$

$$\frac{\Gamma_s \Delta x}{(\delta y)_s}, \quad F_s = (\rho v)_s \Delta x.$$

(b2)~(b5)式中 P 为 F 与对应 D 之比, $A(|P|)$ 在不同的差分格式下表达式不同:

中心差分: $A(|P|) = 1 - 0.5|P|$,

上风格式: $A(|P|) = 1$,

混合格式: $A(|P|) = \max(0, 1 - 0.5|P|)$,

幂函数: $A(|P|) = \max(0, (1 - 0.5|P|)^5)$,

指数函数(精确解): $A(|P|) = |P|/(\exp(|P|) - 1)$.

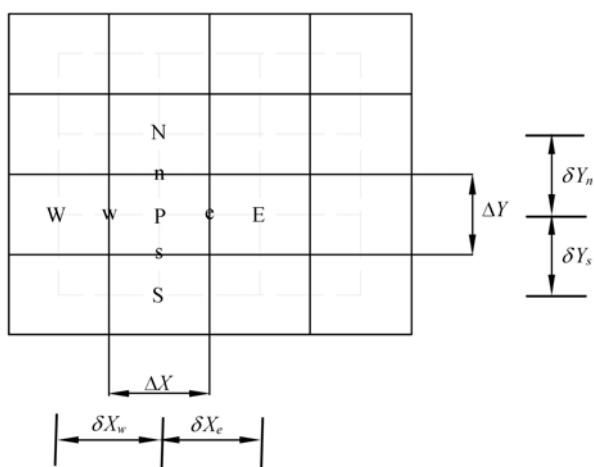


图 B1 二维网格划分示意图

定义 A 矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} a_{p,1,1} & a_{e,1,1} & \cdots & 0 & \cdots & a_{n,1,1} & \cdots & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ a_{w,2,1} & a_{p,2,1} & a_{e,2,1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & a_{s,i,j} & \cdots & a_{w,i,j} & a_{p,i,j} & a_{e,i,j} & \cdots & a_{n,i,j} & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 & \cdots & a_{s,m,m} & \cdots & 0 & \cdots & a_{w,m,m} & a_{p,m,m} \end{bmatrix}.$$

根据 $SFIF$ 矩阵的定义可以看出, $SFIF$ 矩阵即为 A 矩阵的逆矩阵 $= A^{-1}$. 需要说明的是, 虽然对不同的差分格式 A 的表达式有所不同, 但一般说来, 采用合适的计算格式对流场计算结果影响很小. 因此, 当选择不同格式计算出的流场相差很小时, 计算出的 $SFIF$ 矩阵相差也很小. 虽然本文中所有的算例均基于上风格式, 但对于问题的分析和计算结果影响甚微.