

一种改进的放射性气体扩散高斯预估模型算法^{*}

李世威, 王建强, 曾俊伟

(兰州交通大学 交通运输学院, 兰州 730070)

摘要: 通过对放射性气体扩散的特征描述, 针对高斯预估模型存在的缺点, 引入了动态变化的泄漏强度, 并通过夹角系数的方式将风速和放射性气体自身的扩散速度合成, 得到对气体扩散起到关键作用的合成扩散速度, 进而更好地模拟了放射性气体扩散过程中在不同时段、不同区域、不同气流状态下的气体浓度。最后通过实验仿真模拟, 表明该算法在一定条件下能够有效地计算出放射性气体泄漏后的不同时间点和不同气流状态下的扩散浓度空间分布, 能够较好地模拟放射性气体扩散的动态变换过程, 对放射性气体泄漏事故现场的预测和评估具有很好的辅助决策作用。

关键词: 高斯模型; 放射性气体; 扩散; 泄漏强度; 气流状态; 扩散速度

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)01-0123-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.034

Improved Gaussian estimate model algorithm for radioactive gas diffusion

LI Shi-wei, WANG Jian-qiang, ZENG Jun-wei

(School of Traffic & Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: By analyzing the characteristics of radioactive gas diffusion based on Gaussian model's limitation, this paper introduced the dynamic rate of leakage, and synthesized the wind speed and diffusion velocity of radioactive gas using angle's approach. This synthetic velocity played a key role in radioactive gas diffusion. Then according to the improved Gaussian estimate model algorithm, it was better simulation of the radioactive gas concentrations in the diffusion process at different times, in different regions and in different state of airflow. Finally, it used the test simulation to illustrate that the model is effective for prediction and evaluation of radioactive gas diffusion, and suitable for decision-making and emergency-responding to accidental radioactive gas releases.

Key words: Gaussian model; radioactive gas; diffusion; rate of leakage; state of airflow; diffusion velocity

放射性气体污染事故不同于一般的环境污染, 是突然发生、来势凶猛, 在瞬时或短时间内大量排放污染物, 对大气环境造成严重的污染和破坏, 给人民和国家财产造成重大损失的污染事故^[1]。尽管国家在设计 and 运行管理等方面采取了严格的纵深防御措施, 但核电站发生事故的可能性还是不能完全排除。例如, 2011 年 3 月 11 日 13 时 46 分, 日本东北部宫城县以东太平洋海域发生里氏 9.0 级地震, 引发海啸导致福岛第一核电站六座反应堆不同程度被损坏。在这种发生不可控的放射性释放事故的情况下, 为了保护核电站周围公众的健康与安全, 需要采取相应的紧急防护措施, 如隐蔽、服用稳定碘片、撤离等。而确定这些决策的前提条件是准确估计核素泄漏的污染范围和区域, 以划定警戒区和确定周围居民的疏散范围。因此, 计算核泄漏过程中空气中放射性气体的浓度分布是非常必要的, 它是采取一系列应急措施的基础和前提^[2]。

1 Gaussian 预估模型

目前, 比较常见和应用广泛的放射性气体扩散模型主要有 Gaussian、BM、Sutton 和 FEM3^[3] 等。由于 Gaussian 模型适用于比较均匀稳定的流动条件, 能反映出在放射性气体危险浓度危

害区内, 放射性气体浓度随扩散半径递减, 并能反映出在某一受害点位的放射性浓度随扩散时间呈单峰型的动态变化, 这与放射性气体扩散的实际情况接近。因此, Gaussian 模型被广泛应用于评价放射性气体泄漏后的扩散预估^[4]。

对放射性气体扩散过程的研究必须依据扩散结果的稳定与否, 对扩散类型进行分类, 而扩散结果的稳定与否又取决于泄漏源的释放时间长短。依据泄漏源的释放时间长短, 放射性气体扩散可分为连续性和瞬时性泄漏两种情形。因而 Gaussian 模型包括 Gaussian 烟团模型和 Gaussian 烟羽模型^[4]。

瞬时性泄漏是指泄放时间相对于扩散时间比较短的泄漏。瞬时泄漏后的放射性气体扩散模式可以理解为在很短暂的时间内瞬间释放了一个有毒气体气团, 通常采用 Gaussian 烟团模型来进行数学描述^[5]。

连续性泄漏是指泄漏源是连续源或泄漏时间大于或等于扩散时间。连续泄露后的大气扩散模式可以认为是一种稳定型泄放, 即在一段时间内放射性气体排放量较为稳定, 通常采用 Gaussian 烟羽模型来进行数学描述^[5]。

Gaussian 烟团模型和 Gaussian 烟羽模型的区别主要在于不同流场分段条件下的差别。在均匀稳定流场中, 这两种模型的模拟结果相近; 而在非均匀稳定的流场中, 分段烟羽模型的

收稿日期: 2011-06-02; 修回日期: 2011-07-27 基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(096RJA088)

作者简介: 李世威(1981-), 男, 甘肃白银人, 硕士, 主要研究方向为数据挖掘、决策分析(1st9647@126.com); 王建强(1980-), 男, 硕士, 主要研究方向为数据挖掘、信息处理; 曾俊伟(1982-), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为数据挖掘、决策分析。

模拟结果呈现明显的不连续性,而瞬时释放的烟团模型比分段烟羽模型更符合实际情况^[6]。因此,Gaussian 烟团模型能克服 Gaussian 烟羽模型的局限性,在负载条件下可以较为真实地模拟放射性气体在大气传输中的时空分布,故本文只针对运用 Gaussian 烟团模型来解决放射性气体的扩散问题。

Gaussian 烟团模型的数学表达式为^[4]

$$C(x,y,0) = \frac{2Q_0}{(2\pi)^{1.5}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}} e^{-\frac{z_0^2}{2\sigma_z^2}} \quad (1)$$

其中: $C(x,y,0)$ 表示地面坐标 $(x,y,0)$ 处放射性气体的浓度; Q_0 表示泄漏强度; σ_x 表示 x 方向上的扩散系数; σ_y 表示 y 方向上的扩散系数; σ_z 表示 z 方向上的扩散系数; (x_0,y_0,z_0) 表示烟团中心坐标。

Gaussian 烟团模型因其计算量小、简单易用等特点而被广泛应用,但是该模型实际应用中也存在许多局限性。首先,Gaussian 烟团模型假设泄漏强度 Q_0 是个常数,这通常是不符合实际情况的,对于放射性气体扩散来说,其泄漏强度随扩散时间动态变化,在扩散初期近似服从指数分布;其次,尽管有很多改进的 Gaussian 烟团模型,建立了以时间函数为动态变换基点的有毒气体扩散模型,并将有限时间内的有毒气体连续释放过程表述为实源和一系列虚源在多个时间区段内的释放子过程的组合^[4],但是缺乏在不同气流状态下模拟放射性气体泄漏后的任意时间点的扩散浓度空间分布。此外,在放射性气体扩散的过程中,自然界会对气体进行一定微量的吸收,并不是一成不变的。因此,本文基于以上 Gaussian 烟团模型的缺点进行相应改进。

2 改进的高斯预估模型

2.1 模型假设

- a) 气团在平整、无障碍物的地面上扩散。
- b) 气团中不发生化学反应和相变反应,也不发生液滴沉降现象。
- c) 在无风情况下,气体扩散速度 s 不随时间变化,即为匀速向四周扩散。
- d) 风向为水平方向,风速和风向不随时间、地点和高度变化,气团中心的移动速度或云羽轴向蔓延速度等于环境风速。
- e) 气团和环境之间无热量交换。
- f) 气团内部和云羽横截面上浓度、密度等参数服从 Gaussian 分布。
- g) 在气体泄漏持续总时间 T 内将产生 N 个同质量的放射性气团,每个气团的扩散均符合 Gaussian 烟团模式的瞬时体源扩散模型,可将放射性气体泄漏扩散过程等价于这 N 个气团的分别扩散效果的叠加。

2.2 Gaussian 预估模型的改进

放射性气体的扩散受到多方面的因素影响,其中最直接的两个因素为泄漏强度和气流状态(本文简称为“风”)。

对于泄漏强度 Q_0 ,Gaussian 模型假设其为一个常数,这种假设并不符合实际情况。对于放射性气体泄漏而言,由于有效控制放射性气体泄漏过程的复杂性和时滞性,因此在泄漏前期一段时间,其泄漏强度是随时间的变化而变化,近似服从指数

分布。假设该放射性气体的泄漏强度公式为

$$Q'_0 = Q'_0 \cdot e^{-r} \quad (2)$$

其中: Q'_0 表示该放射性气体泄漏强度的期初估计值,来自于现实问题的统计分析; r 表示放射性气体泄漏强度的影响因子, $r = uN$ 是 $(0,N)$ 间的随机数, u 为服从 $(0,1)$ 均匀分布的随机数, N 为该放射性气体泄漏强度的极限因子,根据实际问题来设置; t 表示当前时刻。

假设 $C(x,y,0)$ 表示观测点地面坐标 (x,y) 处的放射性气体的浓度, t 为时间因子,表示气体泄漏开始后的时间, i 为泄漏产生的第 i 个气团。假设泄漏点在地面附近,则 $z_0 = 0$;烟团中心的移动速度为气团的扩散速度,则 $x_0 = s(t-i)$, $y_0 = s(t-i)$ 。

将 Q'_0, x_0, y_0, z_0 代入 Gaussian 烟团模型式(1),得第 i 个气团 t 时刻在 $(x,y,0)$ 处的浓度增量为

$$C(x,y,0) = \frac{2Q'_0}{(2\pi)^{1.5}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{(x-s(t-i))^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(y-s(t-i))^2}{2\sigma_y^2}} \quad (3)$$

由于放射性气体在扩散过程中自然界会对气体有一定的吸收,会造成气体浓度的微量下降。为了更好地模拟实际情况,该模型结合自然界对放射性气体的吸收量,为气团浓度设置一个衰减系数 ρ ,其取值为 $0.001 \leq \rho \leq 0.01$,使得该模拟过程更加符合实际。

假设气体总泄漏时间为 T ,每个单位时间产生一个气团,则从泄漏开始时刻到 t 时刻共产生了 n 个气团:当 $t \leq T$ 时, $n = t$;当 $t > T$ 时, $n = T$ 。所以在泄漏时间 t 内,共计有 n 个气团,在观测点 $(x,y,0)$ 处气团的浓度分别为 C_1, C_2, \dots, C_{n-1} 个气团衰减后的浓度和新到达气团 C_n 浓度的叠加。因此, t 时刻在观测点 $(x,y,0)$ 处的浓度 C_t 为

$$C_t = C_n + (1-\rho)C_{n-1} + \dots + (1-\rho)^{n-1}C_1 \quad (4)$$

在有风的情况下,观测点的气体扩散速度由风速和气体自身的扩散速度共同决定,而在相对稳定的大气环境下,不同观测点的风速又受到风向的作用,会出现完全顺风、局部顺风、无风、完全逆风和局部逆风等情况。泄漏源 O 与观测点 A 和风速 v 之间的夹角关系如图1所示。

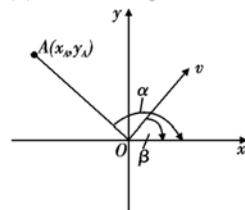


图1 泄漏源、观测点、风速之间的夹角关系

图1中: α 表示观测点与泄漏源 O 的连线和以泄漏源为原点的坐标系 x 轴的正向夹角, β 表示风向与以泄漏源为原点的坐标系 x 轴的正向夹角。

根据 α 和 β 求出观测点 A 与风速 v 之间的夹角,并转换成 $[0,180^\circ]$ 间的值 γ ,其计算公式为

当 $\alpha \geq \beta$ 时

$$\gamma = \begin{cases} \alpha - \beta & \text{当 } \alpha - \beta \leq 180^\circ \\ 360^\circ - (\alpha - \beta) & \text{当 } \alpha - \beta > 180^\circ \end{cases} \quad (5)$$

当 $\alpha < \beta$ 时

$$\gamma = \begin{cases} \beta - \alpha & \text{当 } \beta - \alpha \leq 180^\circ \\ 360^\circ - (\beta - \alpha) & \text{当 } \beta - \alpha > 180^\circ \end{cases} \quad (6)$$

然后将 γ 换算成 $[-1,1]$ 间的数 a ,其换算公式为

$$a = (90^\circ - \gamma) / 90^\circ \quad (7)$$

其中: a 称为观测点风速系数, $a=1$ 表示完全顺风情况, $0 < a < 1$ 表示局部顺风情况, $a=0$ 表示无风情况, $-1 < a < 0$ 表示局部逆风情况, $a=-1$ 表示完全逆风情况。

将风速 v 、观测点风速系数 a 和扩散速度 s 进行合成,得到观测点的合成扩散速度 μ :

$$\mu = av + s \quad (8)$$

其中:当 $\mu < 0$ 时,表示由于逆风的强作用,不会有放射性气体扩散到该观测点,所以此时令 $\mu = 0$ 。

假设 $C(x, y, 0)$ 表示下风向地面坐标 (x, y) 处的放射性气体的浓度, t 为时间因子,表示气体泄漏开始后的时间, i 为泄漏产生的第 i 个气团。假设泄漏点在地面附近,则 $z_0 = 0$; 烟团中心的移动速度为合成扩散速度 μ , 则 $x_0 = \mu |\cos \alpha| (t - i)$, $y_0 = \mu |\sin \alpha| (t - i)$ 。

当合成扩散速度 $\mu \geq 0$ 时,将 x_0, y_0, z_0 代入 Gaussian 烟团模型式(3),则第 i 个气团在 t 时刻在 $(x, y, 0)$ 处的浓度增量为

$$C(x, y, 0) = \frac{2Q_0'}{(2\pi)^{1.5}\sigma_x\sigma_y\sigma_z} e^{-\frac{(x-\mu|\cos\alpha|(t-i))^2}{2\sigma_x^2}} e^{-\frac{(y-\mu|\sin\alpha|(t-i))^2}{2\sigma_y^2}} \quad (9)$$

根据式(4)可得到 t 时刻在观测点 $(x, y, 0)$ 处的叠加浓度 C_i 。当合成扩散速度 $\mu < 0$ 时,第 i 个气团在 t 时刻在 $(x, y, 0)$ 处的浓度增量为 0,则 t 时刻在观测点 $(x, y, 0)$ 处的叠加浓度 C_i 为前 $n - 1$ 个气团衰减后的浓度叠加。

3 实验结果与讨论

在实际应用中,扩散系数与大气稳定度紧密相关,根据天空中观测的风速、云量、云状和日照等天气资料,将大气的扩散稀释能力分为 A、B、C、D、E、F 六个稳定级别^[7]。其确定方法如表 1 所示。从 A 到 F 大气的稳定度逐渐增强。

表 1 大气稳定度的确定

地面风速/ m/s	白天太阳辐射			夜间条件	
	强	中	弱	阴天且云层薄、 或低空云量为 4/8	天空云 量为 3/8
<2	A	A~B	B	-	-
2~3	A~B	B	C	E	F
3~4	B	B~C	C	D	E
4~6	C	C~D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

通常,随着大气稳定度的增加,扩散系数减小。本文采用文献[7]中的 Briggs 扩散参数,如表 2 所示。

表 2 Briggs 扩散参数

大气稳定度	$\sigma_x = \sigma_y$	σ_z
A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1/2}$
F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.16x(1 + 0.0003x)^{-1/2}$

在整个实验模拟过程中,假设大气稳定度为 B,现有浓度为 P 的放射性气体,初始泄漏强度 Q_0' 为 5 kg/s ,极限因子 N 为 3,以 2 m/s 的速度均匀地向大气四周扩散。

1) 在无风的情况下

预测时间为 24 h 和 48 h,在不同距离范围内放射性气体浓度变化如图 2 和 3 所示。

从图 2 和 3 的模拟结果可知,在无风的情况下,放射性气体依靠自身的扩散速度,以泄漏源为圆心,均匀向四周扩散,在距离相同的地区放射性气体浓度相同,从而得到一组同心圆。由于气体扩散强度随着时间的增加而增加,因此,在同一距离范围内,随着时间的增加,放射性气体浓度也在不断地增加。在 24 ~ 48 h 内,距离泄漏源 5 000 m 的地方,放射性气体浓度由 $7.88 \text{ E} - 11 \text{ kg/m}^3$ 增加到 $11.24 \text{ E} - 11 \text{ kg/m}^3$ 。

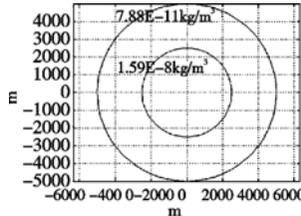


图 2 无风情况下 $t=24 \text{ h}$ 时不同地区浓度变化

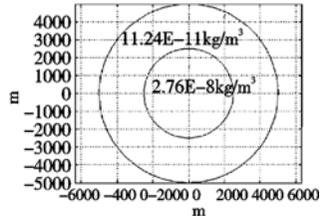


图 3 无风情况下 $t=48 \text{ h}$ 时不同地区浓度变化

2) 在风速为 5 m/s、风向东偏北 20° 的情况下

距离泄漏源 10 km 和 50 km 处,放射性气体的浓度随时间变化趋势如图 4 和 5 所示。

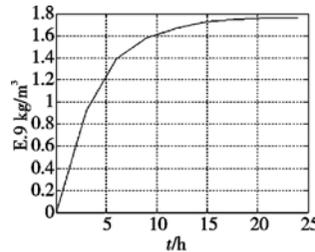


图 4 距离泄漏源 10 km 处放射性气体浓度变化

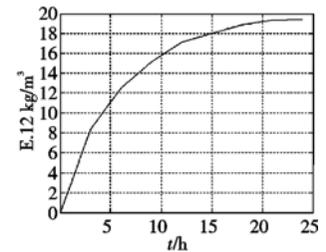


图 5 距离泄漏源 50 km 处放射性气体浓度变化

从图 4 和 5 可以看出,随着时间的增加,放射性气体浓度增加的速度逐渐变慢。

3) 在 $t=48 \text{ h}$ 、风速为 5 m/s、风向正东的情况下

下风向放射性气体浓度区域变化范围如图 6 所示。

应用该模型来模拟日本福岛核泄漏情况。假设在 $t=24 \text{ h}$,大气稳定度为 B,风速 5 m/s ,风向西南偏南 20° 的条件下,其模拟结果如图 7 所示。

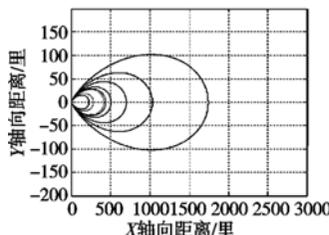


图 6 下风向放射性气体浓度区域变化范围

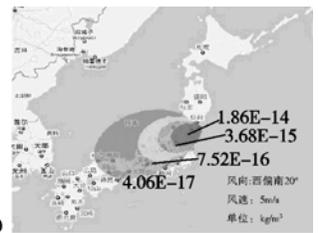


图 7 福岛放射性气体 $t=24 \text{ h}$ 时浓度变化

当 $t=24 \text{ h}$ 、大气稳定度为 B、风速为 5 m/s 、风向正西时,下风向不同距离范围内放射性气体浓度变化如表 3 所示。

表 3 下风向不同距离处放射性气体浓度

距离/km	气体浓度/ kg/m^3	距离/km	气体浓度/ kg/m^3
1	$1.67\text{E} - 09$	10	$8.03\text{E} - 11$
2	$7.28\text{E} - 10$	20	$2.41\text{E} - 11$
3	$4.51\text{E} - 10$	30	$4.87\text{E} - 12$
4	$3.14\text{E} - 10$	40	$4.12\text{E} - 13$
5	$2.32\text{E} - 10$	50	$2.18\text{E} - 14$

随着核泄漏的持续,在大气稳定度为 B,风速 5 m/s 、风向正西的情况下,当日本福岛核泄漏持续 106 h 后,放射性气体可扩散到我国上海地区,120 h 后可扩散到我国北京地区,但放

射性气体浓度极低,对我国基本无影响。

当 $t = 120$ h、大气稳定度为 B、风速 5 m/s,风向为西偏南 20° 时,放射性气体对我国东南沿海地区的影响如图 8 所示。

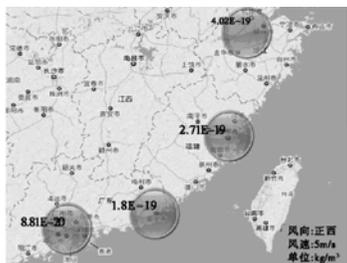


图8 福岛放射性气体 $t=120$ h对我国东南沿海地区影响

由图 8 可以看出,在该模拟条件下,日本福岛核泄漏 120 h 后,对我国东南沿海地区基本无影响。

4 结束语

本文在基本 Gaussian 模型的基础上,采用了动态变化的泄漏强度,通过夹角系数的方式将风速和放射性气体自身的扩散速度合成,得到对气体扩散起到关键作用的合成扩散速度,进而更好地模拟了放射性气体扩散过程中在不同时段、不同区域、不同气流状态下的气体浓度。在气体扩散的过程中,自然界会对气体进行一定量的吸收。因此,在同一地区气体的浓度会随时间的增长而降低,并不是一成不变的。鉴于此,本文引入了放射性气体浓度衰减系数,从而能够更好地模拟实际情况中气体扩散过程的浓度变化。最后通过实验模拟,验证该模型能够帮助相关部门有效预估各种条件下的放射性气体污染范围,进而及时作出科学合理的应急决策。由于本文的预估模型是在一定假设条件的基础上构建的,并且只考虑了放射源强度由小到大的过程,并未考虑放射源强度从最大点降到 0 时的气体扩散过程的浓度变化。因此,可在该预估模型的基础上进一步引入实际影响因素,并采取一定方法来模拟放射性气体泄漏强度降低的过程,将是笔者对该模型今后努力的方向。

参考文献:

[1] 杨湘山,吕蕊,李冰,等.新形势下的核安全与辐射安全对策[J].

中国安全科学学报,2005,15(7):48-51.

[2] 魏东,董法军,董希琳,等.核事故中放射性核素扩散浓度的理论预测[J].中国安全科学学报,2006,16(3):107-113.
 [3] 何宁.有毒气体扩散模型在事故救援中的应用[J].自然灾害学报,2009,18(5):197-200.
 [4] HE Ning, WU Zong-zhi, ZHENG Wei. Simulation of an improved Gaussian model for hazardous gas diffusion [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(4):571-580.
 [5] 全纪龙,王浩,雷阳,等.有毒气体扩散预测法在大气环境应急监测布点中的应用[J].环境工程,2010,28(2):102-105.
 [6] TANAKA T, AZUMA T, EVANS J A, et al. Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(13): 2162-2170.
 [7] ROBINS A. Wind tunnel dispersion modeling some recent and not so recent achievements [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(12):1777-1790.
 [8] ROSEN M A, AO Yong-an. Feasibility of using exergy to assess air pollution levels around a smokestack [J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute, 2005, 21(3):73-76.
 [9] DANDRIEUX A, DIMBOUR J P, DUSSERM G. Are diffusion models suitable for simulating small gaseous chlorine releases [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(6): 683-689.
 [10] ROSEN M A, AO Yong-an. Using exergy to assess air pollution levels from a smokestack? Part 1: methodology [J]. International Journal of Exergy, 2008, 5(4):375-387.
 [11] ESSA K S M, ELOTAIFY M S. Mathematical model for hermitized atmospheric dispersion in low winds with eddy diffusivities as linear functions of down wind distance [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2007, 96(3-4):265-275.
 [12] IIZUKA S, KONDO H. Large-eddy simulations of turbulent flow over complex terrain using modified static eddy viscosity models [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(5): 925-935.

(上接第 118 页)

4 结束语

本文首先分析了 item-based 协同过滤中传统相似性计算方法在评分数据稀疏的情况下计算项目之间相似性时存在的问题。针对上述问题,提出了一种基于项目之间相似性的协同过滤推荐算法。该算法通过结合用户对项目的评分和项目之间的兴趣度来进行项目之间相似性的计算,克服了传统相似性计算方法只依据用户评分的不足。实验结果表明,该算法弥补了传统相似性计算方法存在的弊端,有效地提高了推荐系统的推荐质量。

参考文献:

[1] MICHEAL K, DAMIANOS G, ARISTIDES M. A mobile tourism recommender system [C]//Proc of the 15th IEEE Symposium on Computers and Communications. 2010: 840-845.
 [2] ADOMAVICIUS G, TUZHILIN A. Toward the next generation of recommender systems: a survey of the state-of-the-art and possible extensions [J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering,

2005, 17(6):734-749.

[3] SARWAR B, KARYPIS G, KONSTAN J, et al. Item-based collaborative filtering recommendation algorithms [C]//Proc of the 10th International Conference on World Wide Web. New York: ACM Press, 2001:285-295.
 [4] 李雪,左万利,赫枫岭,等.传统 item-based 协同过滤推荐算法改进[J].计算机研究发展,2009,46(z2):394-399.
 [5] 邓爱林,朱扬勇,施伯乐.基于项目评分预测的协同过滤算法[J].软件学报,2003,14(9):1621-1628.
 [6] HOROZOV T, NARASIMHAN N, VASUDEVAN V. Using location for personalized POI recommendations in mobile environments [C]//Proc of International Symposium on Application and the Internet. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006:124-129.
 [7] GONG Song-jie. Employing user attribute and item attribute to enhance the collaborative filtering recommendation [J]. Journal of Software, 2009, 4(8):883-889.
 [8] 李春,朱珍民,高小芳,等.基于邻居决策的协同过滤推荐算法[J].计算机工程,2010,36(13):34-39.
 [9] 谢季坚,刘承平.模糊数学方法及其应用[M].2版.武汉:华中科技大学出版社,2000:81-85.