

大气环境污染优化控制的实际问题

陈红岩 胡 非 曾庆存

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

陈家宜

(北京大学环境科学研究中心, 北京 100871)

摘 要 讨论了大气环境污染优化控制理论和应用中的几个实际问题以及可以采用的一些分析和解决实际问题的方法, 包括系统化分析方法、数据库的设计与实现、实用空气质量模式、优化控制问题的数学描述和求解、污染物方程及其伴随方程的线形规划求解等, 同时给出了在大气环境容量规划和总量控制研究中的实现步骤。

关键词 大气污染 优化控制 自然控制论 系统分析

1 引言

随着工业的发展, 城市的大气污染日益严重。为了控制城市的大气污染, 必须建立各城市的大气污染模式。近年来, 我国许多城市都进行了城市多源大气扩散模式的研究, 并在研究中积累了丰富的经验, 从简单的高斯模式到考虑复杂的化学反应和物理作用因素的复杂模式^[1~3], 计算机速度和软件技术水平的大幅提高, 至今已可以很快地运行含有复杂的物理化学过程的模式。

运筹学理论越来越多地运用于城市大气环境规划研究和污染源综合治理最优化方案研究等, 其中线性规划方法的使用最为广泛。线性规划模型也可以应用在城市污染工业布局的优化、大气环境容量研究、总量控制研究等方面。问题关键是把实际问题转化成线性规划问题, 选择合理的目标函数和约束条件。

大气环境污染控制是一个系统化的综合问题, 它的数据、模型建立和维护都需要系统科学的指导。管理信息系统是一门综合科学, 它综合运用了管理科学、系统科学、运筹学、统计学及信息科学等的概念和方法, 在这些学科的基础上形成了一套信息加工的方法。本文从系统化研究、大气过程的数值模拟和优化控制的方法三个方面讨论了一些方法在大气环境污染优化控制研究中的应用。在计算机技术飞速发展的今天, 充分利用先进计算机的速度和管理优势, 综合运用大气物理、大气化学、运筹学、控制论、系统科学以及信息科学的研究成果, 对经济地优化控制大气环境污染有着重要的实用价值。

2 系统化方法的应用

2.1 管理信息系统的概念和方法

1985年, 美国明尼苏达大学达尔森管理学院著名教授 Godon B. Davis^[4]定义管理信息系统是一个利用手工作业和计算机硬、软件的分析、计划、控制和决策模型以及数

据库的用户-机器系统。它能提供支持企业或组织的运行、管理和决策所需的信息。管理信息系统主要体现了系统的观点、数学的方法及计算机的应用三个要素。

管理信息系统的主要功能有^[4]：(a) 准备和提供统一格式的信息，简化各种统计工作，最大限度地降低信息成本；(b) 及时全面地提供不同要求、不同细度的信息，以期尽快分析解释现象和及时产生控制；(c) 全面系统地保存大量信息，并能很快地查询和综合，为长期决策提供信息支持；(d) 利用数学模型处理信息，以期预测未来和科学地进行决策。

一个典型的大气环境管理信息系统的总体概念可用图 1 表示。信息、系统、管理是管理信息系统的三个基本概念。信息的概念对大气环境管理的意义尤为突出，大气环境系统是一个复杂的系统，由大气物理和大气化学、工业污染源布局结构、城市经济状况等信息因子组成。加强信息的管理可以使大气环境管理工作科学化，而面向大气环境规划的信息为我们预测、规划将来提供了科学依据。系统的观点也有重要的意义，首先系统观点反映了我们的实际工作间的有机联系，可以把大气环境中的工业污染源、气象特征、经济因素等要素有机结合起来，其次系统的观点说明系统各主量之和的贡献大于各主量贡献之和，这种处理方法比我们分别处理系统中各个要素要优越得多。以系统的观点建立的子系统其独立性较强，可以方便地修改、升级等。

2.2 系统分析方法及其实现

在进行系统的设计之前，必须要对系统的结构和用户的需求进行调查、分析，这就需要掌握系统的分析方法，并且在用户的参与下共同完成。

系统分析的方法有许多种类型，以下主要介绍两种：结构化分析方法和原形法。

结构化分析方（SA 方法）的基本思想是：用系统的思想，系统工程的方法，按用

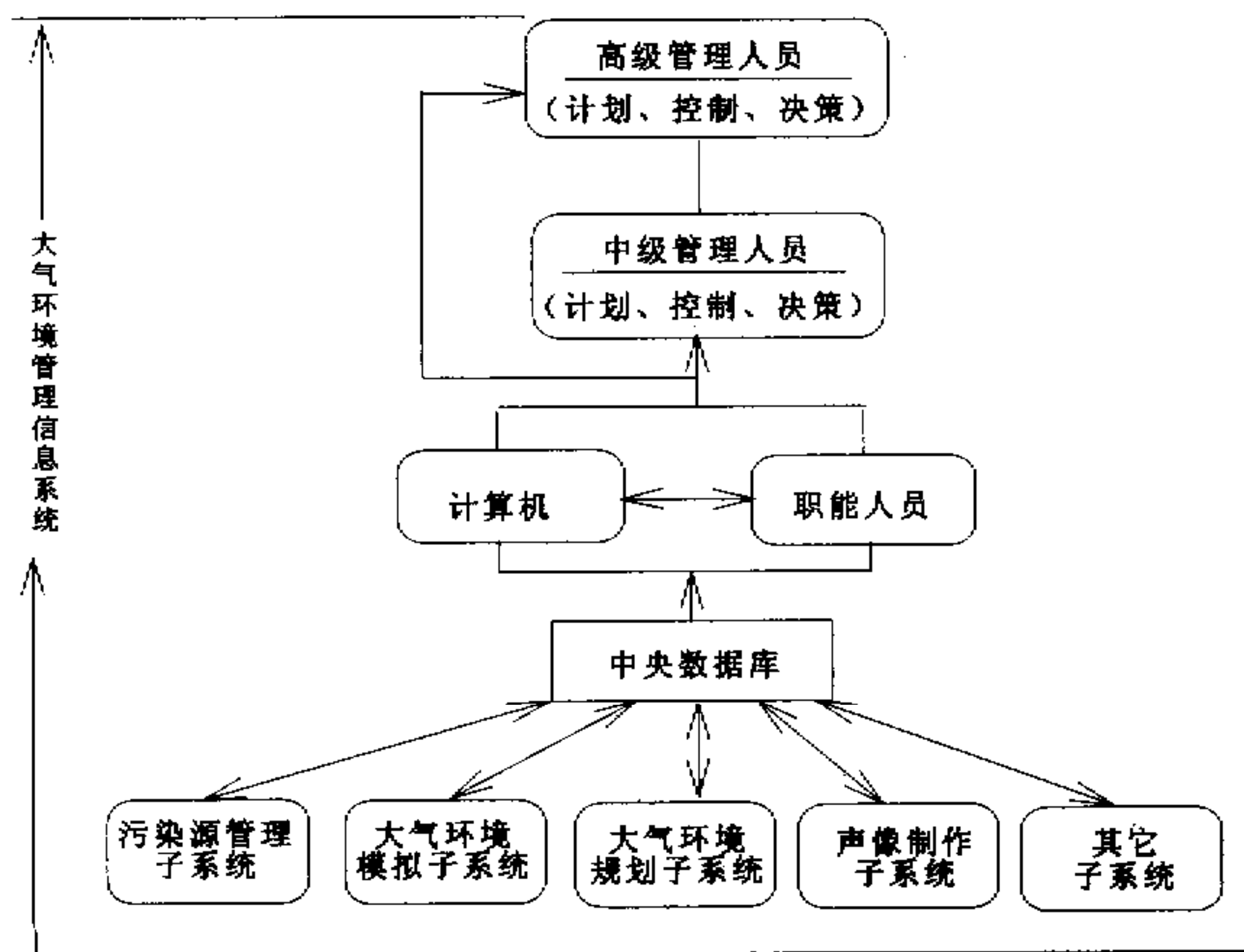


图 1 大气环境管理信息系统的总体概念图

户至上的原则, 结构化、模块化, 自顶向下对信息系统进行分析与设计。SA 方法使用的主要工具有: 数据流程图 (DFD)、数据词典 (DD)、结构化语言、判定树及判定表。

原形法 (Prototyping) 是系统分析人员凭着自己对用户要求的理解, 在强有力的软件环境支持下, 给出一个实实在在的系统模型 (原形或称雏形), 这个模型大致表达了系统分析人员对当前用户要求的理解和他希望的系统实现。然后系统分析人员和用户一起对模型进行评估。评价模型的准确性、是否满足用户的需求、模型的应用环境和输入、输出等。根据评价的结果提出进一步的要求和改进意见, 再对模型进行修改, 周而复始, 直到满意为止。

把 SA 方法和原型方法结合起来使用的方法叫原型化结构分析方法 (P-SA 方法)。

为较好地进行大气环境有关的信息管理和为环境决策提供信息服务, 进行下列的分析是必要的: (1) 组织结构分析; (2) 功能需求分析; (3) 数据及数据流程分析; (4) 功能/数据分析。

通过以上的分析, 我们整理得到系统的逻辑方案: (1) 子系统划分结果; (2) 系统业务应用流程整理; (3) 数据、数据流程分析整理结果。

2.3 系统设计及其实现

系统设计开发过程的第二重要阶段——系统设计的主要任务是: 在科学合理的设计系统总体模型的基础上, 尽可能提高系统的运行效率、可变性、可靠性和工作质量等, 充分利用合理投入创造较高的综合效益。系统设计包括两个方面: 首先是总体结构的设计, 其次是物理模型的设计。

根据系统设计的自顶向下的原则, 首先设计总体结构再逐层深入, 直至每个模块的设计。总体结构主要是在系统分析的基础上, 对整个系统划分, 软硬件配置方案, 数据储存规律和整个系统的实现规划等方面的合理安排。

代码设计就是用数字来代表各种客观实体, 代码问题严格说来就是科学管理的问题。好的代码方案使计算机处理统计、校对、查询工作变得十分方便。

编码可以使一些处理对象唯一化、规范化和可识别化。编码的关键问题在分类, 科学的分类一般遵循下列原则: (a) 有足够的容量包含所有的对象; (b) 按属性系统化; (c) 分类要有柔性, 分类结构不受变更的破坏; (d) 系统间的协调。

3 数据库系统设计

数据库管理系统 (DBMS) 技术是比较先进的数据管理技术, 这种数据管理方法不仅解决了数据共享的问题, 还实现了对数据集中统一管理和保护, 因而更加有效。

数据库模型有层次模型、网状模型、关系模型, 现在常用关系模型。以关系模型为基础的数据库叫关系数据库。关系数据库与层次数据库、网状数据库相比, 具有简单灵活的数据模型、较高的数据独立性、能提供性能良好的语言接口, 并且有比较坚实的理论基础等优点。

关系数据库一般需要规范化, 规范化的好处是消除数据冗余, 简化数据修改, 避免

数据插入和删除的异常等。SQL (Structured Query Language) 语言是以关系代数演算为基础的关系数据库语言, 它使用方便功能很强, 有很普遍的应用。

关系数据库的设计一般经过下面几个步骤:

(a) 系统分析 用户的数据需求规格化, 形成需求说明, 用数据流程图等表述。

(b) 概念设计 独立于计算机软硬件之外, 用户可理解形式表达的信息。常用方法是采用实体联系方法, 建立实体联系模型, 用 ERD (Entity-Relationship Diagram) 表示。

(c) 逻辑设计 逻辑设计的主要目标是产生一个数据库管理系统能处理的模式, 首先满足全部用户的要求, 把实体联系模型转换成关系数据模型。

(d) 物理设计 物理设计是为逻辑数据模型选用适合于应用环境的物理结构, 如 MS-Access, dBASE III, dBASE IV, FoxPro 等。

一个好的数据库系统不仅方便、有效地管理数据, 而且能科学地指导污染源的调查工作, 从而有效地保障了大气扩散模型数据的可靠性。

4 城市大气污染数值模型的建立

较简单实用的大气污染多源模式可以是以高斯模式为基础的, 也可以从基本物质方程数值差分求解^[5]。复杂的模式这里不做讨论, 城市大气污染数值模拟可以根据实际的区域尺度选择适当的模式, 或根据实际业务需要做适当的简化。以下简要介绍一种简单的实用模式。

高斯模式的优点是模式分辨率较高, 计算量较少, 缺点是对复杂流场的修正较难。高斯模式可以适当考虑污染物的物理、化学过程, 如硫化物的化学转化和 TSP 沉降, 烟尘粒子的浓度计算考虑部分反射和烟尘的沉降。面源可以采用具有源高修正的 ATDL 模式 (由 Hanna-Gifford 提出)^[3], 线源可以由点源的线积分得到, 烟气的抬升可按国标 GB3840-83 计算。

计算长期平均浓度要首先计算风向、风速、稳定度的联合频率, 得到年、季、月的联合频率表, 然后计算各种情况下的浓度, 再与联合频率相乘求和, 即为该年、季或月的长期浓度平均值。

模式本身简化的误差, 城市流场的复杂性引起的误差和模式应用数据的误差都会造成不同程度的计算结果的误差。实际应用中, 由于污染源调查的复杂因素, 源强相对误差可能较大, 所以源强的误差可能是主要因素。

大气污染数值模型建立的流程如图 2 所示。

5 优化控制原理

前苏联著名科学家马尔丘克 (Marchuk)^[6]曾对于污染源优化布局问题, 从大气运动基本方程和伴随方程出发给出了理论和数值解法。该方法用于总量控制和优化控制有一定的价值。

我国科学家曾庆存院士提出的自然控制论^[7], 为大气环境污染优化控制的问题建立

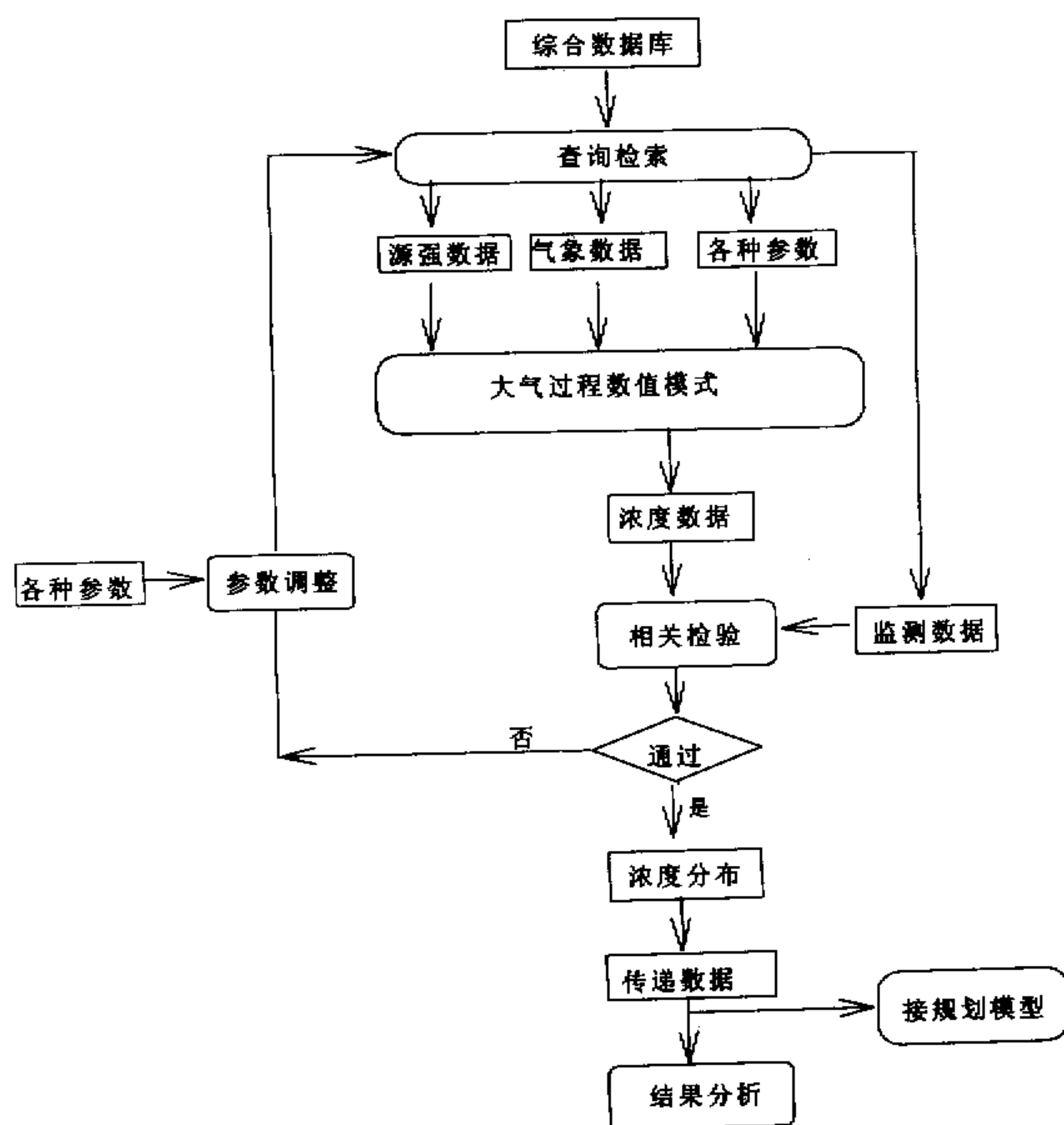


图2 大气污染数值模型建立的流程图

了数学理论框架。现将自然控制论的核心问题描述如下:

设我们要利用的自然环境部分变量或与之有关的全体变量为集合 $X(r, t)$, 它随空间 r 与时间 t 改变。与之有关的人文变量为 $Y(r, t)$, 这些变量作用在 $X(r, t)$ 上, 自然环境 $X(r, t)$ 的演变同时受自身及人文变量 $Y(r, t)$ 所影响, 可由微分方程描述如下:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = L(X, Y, t). \quad (1)$$

初条件:

$$X|_{t=t_0} = X(r, t_0). \quad (2)$$

边条件:

$$\Lambda(X, Y)|_{\partial\Omega} = G. \quad (3)$$

约束条件:

(a) 人类活动能力限制:

$$\|Y\|_e \leq C, \quad (4)$$

(b) 改变后自然环境接近理想条件:

$$\|X - X_p\|_p \leq D, \quad (5)$$

(c) 求最优 (如经济效益最大或污染最小等):

$$M(X, Y) = \min \text{ 或 } \max. \quad (6)$$

5.1 区域环境容量规划

区域环境容量是指在一定的气象条件及污染源条件下, 某一特定区域在满足该区域大气环境质量目标的前提下, 单位时间所能允许的各类污染源向大气中排放的总量。

该问题的人文变量即是多个污染源 $Y(q_i, r_i, t)$, ($i=1, \dots, n$), 它是源强和地点的函数; 自然变量即是 $X(\varphi, u_i, \dots, r, t)$, 是污染物浓度、风速等的函数。

自然变量的演变方程如下:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = L(X, Y, t), \quad (7)$$

其中重要的是污染物扩散方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = & -u \frac{\partial \varphi}{\partial x} - v \frac{\partial \varphi}{\partial y} - w \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k_H \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_H \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_V \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) - \sigma \varphi + \sum_{i=1}^n Q_i \delta(r - r_i), \end{aligned} \quad (8)$$

写成算子形式为

$$L\varphi = \sum_{i=1}^n Q_i \delta(r - r_i). \quad (9)$$

初边条件为

$$\begin{cases} \varphi = f_s & \text{在 } \Sigma \text{ 面上,} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \alpha \varphi & \text{在 } \Sigma_0 \text{ 面上,} \\ \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 & \text{在 } \Sigma_H \text{ 面上,} \end{cases} \quad (10)$$

$$\varphi(r, T) = \varphi(r, 0), \quad (11)$$

φ_i 是第 i 个污染源单位源强排放形成的浓度分布, φ_s 是区域外污染物的输送或区域内其它源的污染物浓度分布。

约束条件为各个环境区域满足下列浓度标准:

$$Y_k \leq C_k, \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (12)$$

$$Y_k = \int_0^T dt \int_{G_k} p_{ck} \varphi dG \leq C_k, \quad (13)$$

$$p_{ck} = \begin{cases} b_k + a_k \delta(z), & \text{在 } G_k \text{ 区内} \\ 0, & \text{在 } G_k \text{ 区外} \end{cases} \quad (14)$$

$$Y_k = \sum_{i=1}^n Q_i a_{ik} + b_k \leq C_k, \quad (15)$$

$$a_{ik} = \int_0^T dt \int_{G_k} p_{ck} \varphi_i dG, \quad (16)$$

$$b_k = \int_0^T dt \int_{G_k} p_{ck} \varphi_s dG, \quad (17)$$

问题变为可求解的线性规划问题, 该问题还可以由伴随方程 $L^* \varphi_k^* = p_{ck}$ 求解:

$$Y_k = \sum_{i=1}^n Q_i a_{ik}^* + b_{ik}^*, \quad (18)$$

$$a_{ik}^* = \int_0^T dt \varphi_k^* (r_i) dt, \quad (19)$$

$$b_k^* = \int_0^T dt \int_{G_k} \varphi_s^* dG, \quad (20)$$

当源的数目小于环境功能区的数目时, 由基本扩散方程求解只需要解较少的方程, 较为方便; 而当环境功能区的数目小于源的数目时, 由伴随方程求解更为方便。

5.2 总量控制规划

最优化问题的目标函数可以选择下列几种方法。如:

(1) 各污染源削减量总和最小

$$\min Z = \sum_{j=1}^n (Q_{0j} - Q_j), \quad (21)$$

Q_{0j} 为控制前污染物排放量, Q_j 为控制后污染物允许排放量。

(2) 各污染源削减率总和最小

$$\min Z = \sum_{j=1}^n \left(\frac{Q_{0j} - Q_j}{Q_{0j}} \right) = \sum_{j=1}^n \left(1 - \frac{Q_j}{Q_{0j}} \right) = \sum_{j=1}^n R_j, \quad (22)$$

Q_{0j} 为控制前污染物排放量, Q_j 为控制后污染物允许排放量, $R_j = 1 - Q_j / Q_{0j}$ 为削减率。

(3) 各污染源削减花费最小

$$\min Z = \sum_{j=1}^n b_j \Delta Q_j = \sum_{j=1}^n b_j (Q_{0j} - Q_j), \quad (23)$$

Q_{0j} 为控制前污染物排放量, Q_j 为控制后污染物允许排放量, b_j 为第 j 个源削减单位排放量污染物的花费。

对于不同的目标函数, 约束条件可以相应的不同。例如, 对上面第二个方案, 约束条件可以是

$$R_j^T \geq R_j \geq R_j^B, \quad j = 1, \dots, n \quad (24)$$

$$C_{ij} \geq \Delta C_j, \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (25)$$

R_j^T , R_j^B 分别是削减率的下限和上限, ΔC_j 是各控制点的削减浓度, 也就是这个点的浓度和目标浓度 (大气环境质量目标值) 的差, C_{ij} 是某个污染源 j 对评价点 i 的贡献, 它与污染物排放强度成正比例。各个浓度贡献乘以各污染源的削减率的总和等于或大于这

个评价点的浓度超过浓度标准的部分。

5.3 大气环境总量控制规划

大气环境总量控制规划的应用按下面的步骤实现。

(1) 确定基准年

基准年应该具有代表性, 可以从近几年的年平均风速、年平均气温、污染物浓度等逐年分析, 选择比较能代表该城市污染状况的一年, 不能把经济不景气, 生产计划缩减的年份作为基准年。从基准年中应该能得到足够详细的污染源、污染气象、浓度监测的资料, 并建立关系数据库。

(2) 目标值的确定

根据大气环境质量标准确定合适的环境目标值, 根据功能区状况选择合适的质量标准。

(3) 大气污染现状模拟和评价

对大气污染物进行总量控制管理必须了解目前及未来的污染状况, 所以首先要进行污染现状的模拟和评价, 建立合适的大气污染数值模型用以模拟污染现状和预测未来。

(4) 建立大气污染物排放削减量优化分配的线性规划模型

大气污染物总量控制的目标函数是污染物排放量的削减按社会总效益最大, 社会总费用最小为原则确定, 还要考虑对企业的公平性。约束条件是在整个地区, 在不同功能区的所有控制点, 分别满足所在地的环境质量标准。

(5) 制订总量控制方案

根据优化控制规划的计算结果计算平均允许排放量 and 经济优化排放量, 制定总量控制方案。

(6) 用社会经济条件对方案进行评估

作污染物排放量削减方案的费用-效益分析。

图 3 是大气环境容量与总量控制规划的流程。

5.4 应用线性规划方法应注意的问题

正确、恰当地应用线性规划的方法, 还应该注意以下问题:

(1) 选取适当的目标函数

不同的目标函数对规划的结果影响很大, 把实际问题恰当地描述成合适的数学规划问题, 才能得到比较令人信服的决策结果, 所以首先要对实际问题充分地了解再进行恰当的分析, 以便得出合适的目标函数。

(2) 构造充分而必要的约束条件

约束条件不充分, 比如控制点选择过少, 使之不能代表污染源分布, 这样得出的解可能很极端。反之, 约束条件太多会造成不必要的计算资源的浪费, 难于求解。一种可行做法是, 先用均匀分布的控制点, 求出允许排放量后, 以允许的排放量模拟浓度分布, 根据浓度分布的情况, 选取高浓度区的控制点, 如此反复几次, 可得到较优的控制点。

(3) 应用线性规划得出的解最好要经过模拟的检验, 如计算出的允许排放量, 再按允许排放量模拟浓度场, 同环境质量标准比较, 以验证线性规划模式。

(4) 需要说明的是, 实际的系统并不是线性系统, 真正的线性系统是不存在的, 线性规划方法是对实际问题的一种近似。

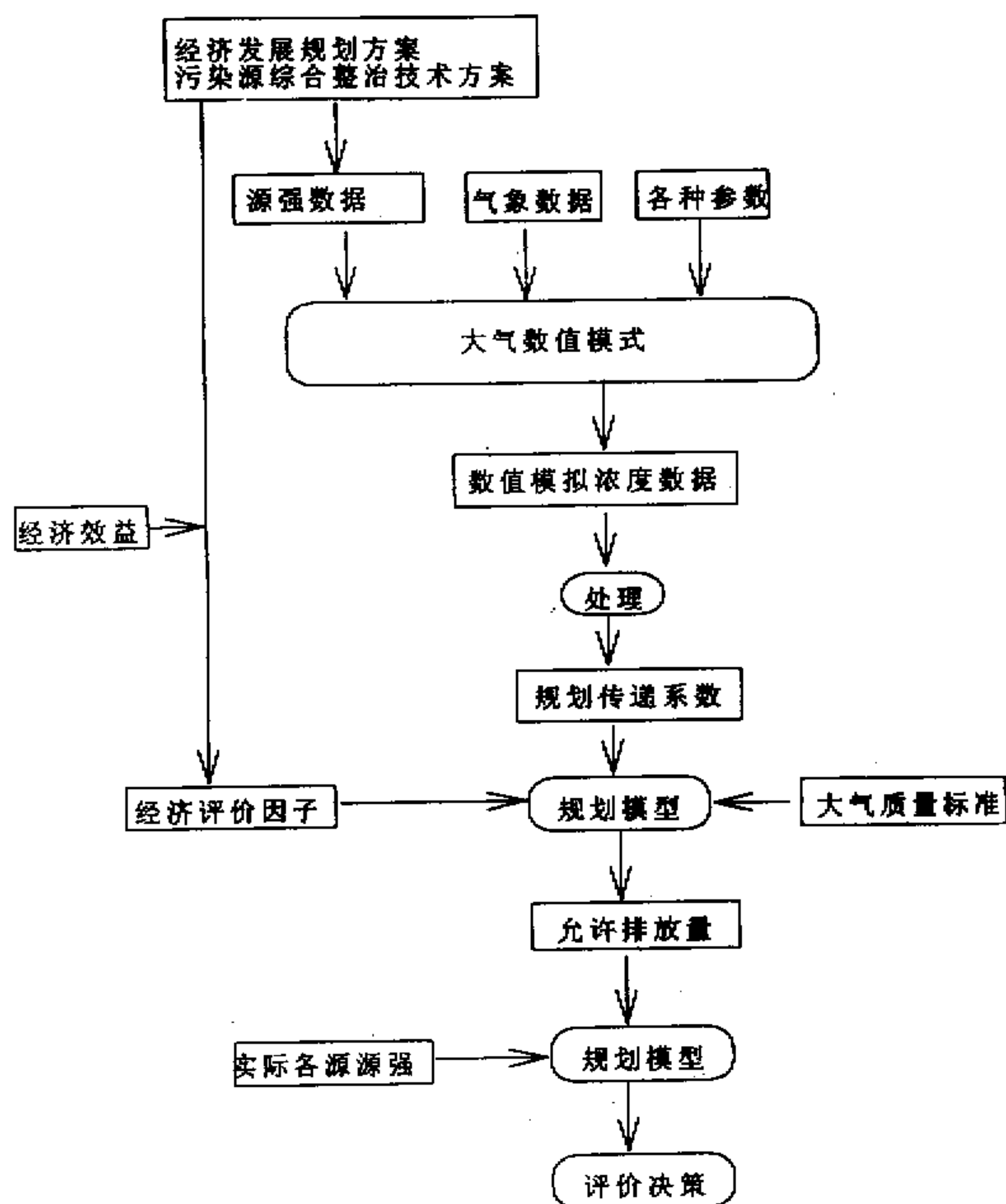


图3 大气环境容量与总量控制规划的流程图

参 考 文 献

- 1 刘健, 1993, 区域大气环境容量模拟系统的理论及其应用研究, 南京大学博士论文.
- 2 赵德山, 1991, 城市大气污染总量控制方法手册, 国家环保局中国环境科学研究院编.
- 3 陈家宜, 王淑芳等, 北京市区域性大气扩散模式研究, 研究报告.
- 4 薛华成, 1993, 管理信息系统, 北京: 清华大学出版社.
- 5 Nieuwstadt F.T.M. and H. van Dop, 1982, *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling*, D. Reidel Publishing Company.
- 6 Marchuk, G.I., 1986, *Mathematical Models in Environmental Problems*, Elsevier Science Publishers.
- 7 曾庆存, 1996, 自然控制论, 气候与环境研究, 1(1), 11~20.

Some Practical Problems of Optimizing Emissions from Pollution Sources in Air

Chen Hongyan, Hu Fei and Zeng Qingcun

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Chen Jiayi

(Research Center of Environmental Science, Peking University, Beijing 100871)

Abstract In this article, we discussed about some practical problems in the optimum reduction air pollution, and suggested some methods to build up the manage information system to provide effective scheme improving air quality. Systems analysis, database analysis and design, and practical maybe not very powerful air pollution models will be proved to be very important. We also give a natural cybernetics description and solution to the problems of reduce air pollution economically. These methods will give economic costs in reduce air pollution, such as in atmospheric environment capacity planning and gross controls.

Key words air pollution optimum reduction natural cybernetics systems analysis
