

# 生态工业园区的MINLP模型

陈定江, 李有润, 沈静珠, 胡山鹰

(清华大学化学工程系, 北京 100084)

**摘要:**生态工业园区的设计和管理需要建立在定量分析的基础上,目前仍然是一个薄弱环节.本文提出了一个引入逻辑表达式的生态工业园区模型,可以通过对一个混合整数非线性规划(MINLP)问题进行求解来获得有价值的参考信息.模型可以分为成员模型和连接模型两部分,成员模型作为积木,通过连接模型搭建成不同拓扑结构的生态工业园区方案.开发的生态工业园区模型具有良好的扩展性、可修改性、可重用性,可以作为生态工业园区决策系统的核心模型.以山东枣庄市南工业区为对象进行了案例分析.模型用非线性优化软件LINGO求解.

**关键词:**生态工业园区;混合整数非线性规划模型;LINGO软件

**中图分类号:** TQ028.8; X13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2002)01-0075-06

## 1 前言

工业生态学的一个重要研究内容是生态工业园区(Eco-Industrial Park, EIP)的设计与管理. EIP是一个包括自然、工业和社会的复合体,它通过成员之间的副产物和废物的交换、能量和废水的逐级利用、基础设施的共享来实现园区在经济效益和环境方面的协调发展.在美国、加拿大等发达国家, EIP的建设正呈迅速发展的势头<sup>[1-3]</sup>.

定量的EIP分析工具对于EIP的设计、管理和发展具有十分重要的意义.目前文献中关于EIP定量分析的方法有4种:投入产出分析<sup>[4]</sup>,基于通用系统理论的复杂系统模拟分析<sup>[5]</sup>,有界网络分析<sup>[6]</sup>,确定性数学规划分析.

模拟软件STELLA可对系统进行动态模拟,并结合其它优化软件进行全系统的多目标优化.优化变量是各控制变量,如蒸汽产生速率、蒸汽调整时间等,优化目标是成员之间物料、能量的供应与需求之间偏差最小.因特网上的一个虚拟组织 Smart Growth 开发了一个软件包—DIET (Designing Industrial Ecosystems Tool)<sup>[7]</sup>,它的功能包括:考察EIP成员各种组合的可行性,在经济、环境和社会效益目标间进行权衡;估算建立工业共生关系后的生态效率;计算成员的环境和经济上的收益.该软件包的核心是一个线性规划模型.王曙光<sup>[8]</sup>提出了一个最小排放社区决策支持系统的多目标混合整数非线性规划(Mixed Integer Non Linear Programming, MINLP)模型.模型的整数变量用以表示项目的投资与否,受投资总额的约束;模型的非线性简单地体现在某一分目标函数(就业目标)上及与整数变量结合的一些约束上.

本文提出了一个EIP的数学规划模型,并通过引入逻辑表达式,增强了模型的表述能力.应用该模型进行了一个EIP案例分析.

收稿日期:2001-02-23, 修回日期:2001-05-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:29836140);清华大学环境科学重点资助项目

作者简介:陈定江(1975-),男,广西横县人,博士研究生,化工系统工程专业.

## 2 生态工业园区的 MINLP 模型

### 2.1 EIP 模型的要求

EIP 的设计者和决策者需要对 EIP 成员各种不同的组合方案进行考察, 因此在设计阶段 EIP 的拓扑结构是经常变化的. 一个通用的 EIP 决策软件运作过程为:

(1) 决策者通过决策界面构造出 EIP 拓扑结构图;

(2) 决策者填入作为约束的经济、环境限制条件, 必要的数由数据库获得或者由决策者输入, 设定好目标函数(如 EIP 整体利润最大);

(3) 决策问题(或者说优化模型)在决策界面的后台自动生成并求解.

本文开发的 EIP 混合整数非线性规划模型能够适应这样的决策过程.

### 2.2 面向对象的 EIP 模型

EIP 模型包括成员模型和连接模型. 成员模型作为积木, 通过连接模型搭建成不同拓扑结构的 EIP 模型. 成员模型具有统一的接口, 它们主要表达成员的原料、产品、副产物、废物、水、电、投资等属性之间的关系. 连接模型除了表达与连接相关的物料平衡关系外, 还引入了逻辑表达式来表达 EIP 成员间的连接约束. 可将逻辑表达式转换成代数表达式, 最终整个 EIP 模型成为标准的 MINLP 问题. 利用优化软件 LINGO<sup>[9]</sup>对生成的 MINLP 问题进行求解. LINGO 的特点是用户只需将模型列出而无需关心具体的求解过程. LINGO 还提供了可供其它程序调用的求解器动态连接库(lingsolv.dll), 这使得利用决策界面生成的 EIP 模型的自动求解成为可能.

从 EIP 模型的扩展性、修改性、可重用性出发, 在构造 EIP 模型时采用了面向对象(Object Oriented)的建模思想, 抽象出针对 EIP 特点的类(class)和属性(attribute), 类可以分成基本类和派生类.

EIP 模型中的基本类有 3 个: 成员类、物流类、投资项目类. EIP 成员类的属性包括成员的利润、耗电量、员工数目等. 物流类可以细分为资源类、废物/副产物类、蒸汽类、水类等. 物流类的属性主要用来表示物料的种类, 如蒸汽类包括不同压力级别的蒸汽, 水类包括不同清洁程度的水(清洁水、再生水、轻度污染水、中度污染水等).

由基本类的组合可得到派生类. 成员类和物流类一起派生出特定成员所具有的物流类(Materials of Specific EIP Member). 该派生类的属性包括各分支物流的流量、价格(罚金)等. 两个成员类和物流类可以派生出物流连接类(Material Linkage). 该派生类的属性包括表示建立连接与否的 0, 1 变量、建立连接的花费等. 成员类和项目投资类一起派生出特定成员的项目投资类(Investment of Specific EIP Member). 该派生类的属性包括各种投资的指标(如净现值指数, NPVI), 表示投资与否的 0, 1 变量、操作费用等.

LINGO 提供的 Set 语句可以实现面向对象的建模思想, 利用它可构建出 EIP 的基本类和派生类及相应的属性.

### 2.3 EIP 的 MINLP 模型

图 1 是一个典型的 EIP 成员模型(虚框内). 成员模型方程是一组表达成员的原料、产品、副产物、废物、水、蒸汽、电、投资等属性之间关系的方程式:

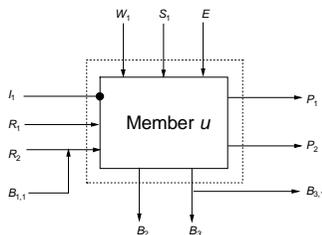


图 1 典型的 EIP 成员模型  
Fig.1 A typical EIP member model

$$\begin{aligned}
 f_{u,R_1} &= g_{u,R_1}(\mathbf{P}, \boldsymbol{\alpha}), \\
 f_{u,R_2} &= g_{u,R_2}(\mathbf{P}, \boldsymbol{\alpha}), \\
 &\quad \text{M} \\
 I_{u,I_1} &= g_{u,I_1}(\mathbf{P}, \boldsymbol{\alpha}).
 \end{aligned}$$

方程左侧是物料流量和投资项目的经济指标等属性，右侧的  $\mathbf{P}$  代表产品产量向量， $\boldsymbol{\alpha}$  代表过程参数向量。下标指明了流的来源和流的属性(物流、能流、货币流)。这些方程可写成统一的形式：

$$\text{attrib}_{u^*} = g(\text{No.}, \mathbf{P}, \boldsymbol{\alpha}), \tag{1}$$

EIP 成员  $u$  的模型用式(1)来描述。No.是函数的 ID 号。模型方程用式(1)形式表达的原因是基于 LINGO 软件的要求(LINGO 对用户自定义函数只提供了@USER 函数作为接口)。

图 2 是一个典型的连接模型，成员  $v$  的废物  $j$  引入到成员  $u$ ，部分或全部地替代物料  $i$ ，物料  $j$  也可以引入到其它成员中。成员间物流的连接应满足物料平衡关系：

$$\begin{aligned}
 f_{u,i} &= g_{u,i} - r_{i,j} f_{v,j,x} \\
 \sum_x f_{v,j,x} &= g_{v,j} \\
 f_{u,i}^x &\geq 0, f_{v,j,x} \geq 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

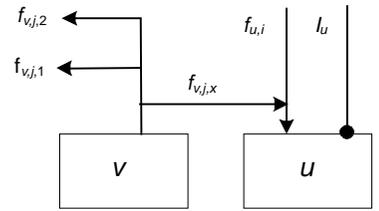


图 2 典型的 EIP 成员连接模型  
Fig.2 A typical material exchange between EIP members

除了物料平衡关系外，还引入了逻辑表达式。考虑决策者可能加入这样的约束条件：只有当流量  $f_{v,j,x}$  大于某个下限  $L_{v,j,x}^f$  时， $u$  和  $v$  之间的物料  $j$  的连接才建立；建立物料连接可能还需要投资  $I_u$ ，而只有投资在其回报率  $N_u$  达到一定的标准  $S_u$  才有可能进行。将不等式  $f_{v,j,x} - L_{v,j,x}^f \geq 0$  与一个(0,1)整数变量  $y_1$  相关联，将不等式  $N_u - S_u \geq 0$  与(0,1)整数变量  $y_2$  相关联，将投资与否与  $u, v$  之间的物料  $j$  的连接建立与否分别与  $y_{inv,u}$  和  $y_{v,k,u}$  相关联，可以得到式(3)所示的一组逻辑表达式：

$$\begin{aligned}
 f_{v,j,x} - L_{v,j,x}^f &\geq 0 \Rightarrow y_1 = 1 \\
 N_u - S_u &\geq 0 \Rightarrow y_2 = 1 \\
 y_{inv,u} &= y_2 \\
 y_{v,k,u} &= y_1 \wedge y_{inv,u} \\
 y_{v,k,u} = 0 &\Rightarrow f_{v,i,x} = 0
 \end{aligned} \tag{3}$$

Grossmann 等<sup>[10]</sup>在将逻辑表达式转换成由整数变量和连续变量组成的代数不等式方面做了许多工作。利用他们的研究成果，可以将式(3)转换成式(4)的一组等式和不等式约束：

$$\begin{aligned}
 f_{v,j,x} - L_{v,j,x}^f &\geq -L_{v,j,x}^f(1 - y_1) \\
 f_{v,j,x} - L_{v,j,x}^f &\leq U_{v,j,x}^f y_1 \\
 f_{v,j,x} &\leq U_{v,j,x}^f y_{v,k,u} \\
 N_u &= g_{u,I_1} \\
 N_u - S_u &\geq L_u^N(1 - y_2) \\
 N_u - S_u &\leq U_u^N y_2 \\
 y_{inv,u} &= y_2 \\
 y_{v,k,u} &= y_{inv,u} y_1 \\
 y_1, y_2, y_{inv,u}, y_{v,k,u} &= 0, 1
 \end{aligned} \tag{4}$$

式中的 $-L_{v,j,x}^f$ 和 $U_{v,j,x}^f$ 分别是 $f_{v,j,x}-L_{v,j,x}^f$ 的下界和上界, $L_u^N$ 和 $U_u^N$ 则是 $N_u-S_u$ 的下界和上界。

作为一个改进的方向,还可以引入基于经验知识的逻辑表达式,如特定的工厂之间可以建立特定的物流匹配。

最后列出的优化模型如下:

$$\max J = \sum_u (p_{sp} + p_{sb} - p_r - p_b - p_w - p_f)_u \text{ s.t.}$$

对于每一个成员 $u$ ,满足约束式(1);对于每一股物料连接,满足约束式(2)和(4);其它约束包括:成员生产能力约束、原料供应约束、环境容量约束、投资规模约束。

目标函数是园区年利润最大,目标函数中的 $p_{sp}$ 和 $p_{sb}$ 代表成员因出售产品和废物/副产物所得的收入; $p_r$ 代表购买新鲜原料的支出; $p_b$ 代表购买其它成员的废物为原料的支出; $p_w$ 代表成员因向园区外排放废物所付的罚金; $p_f$ 代表由于建立成员间共生关系所导致的成员固定资产的投入的增加。

### 3 案例

利用上述 EIP 核心模型作一个案例分析.案例选取的是山东枣庄市南工业园区.该工业园区中已经包括若干成员,其中 3 个核心企业是合成氨厂、热电厂和水泥厂.其它成员包括生产电石乙炔的化工厂、地毯厂、污水处理厂和居民小区。

考虑 3 个不同的方案.方案 1 是考察园区中已有的物料、能量连接,如图 3 中的实线部分.热电厂的蒸汽供居民区冬季取暖,合成氨厂、热电厂和地毯厂的煤渣供给水泥厂作原料.方案 2 是在方案 1 的基础上增加了一些物料、能量连接,如图 3 中的虚线部分.方案 2 面临的挑战是对成员间的连接进行协调.比如地毯厂和热电厂之间的蒸汽连接可以消除低效率的小锅炉,减少  $SO_2$  的排放和煤耗,但煤渣产生量减少,这对水泥厂是不利的。

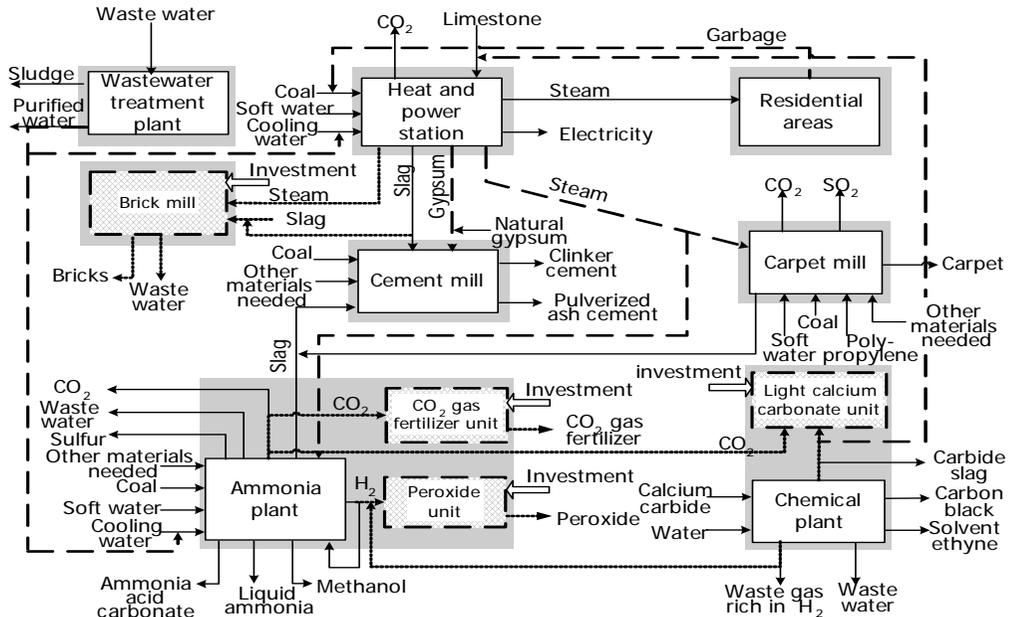


图 3 枣庄 EIP 案例分析

Fig.3 Case study of Zaozhuang EIP

方案 3 又在方案 2 的基础上根据市场需求和质、能集成的策略增加了一些新的成员和新的物、能连接,如图 3 中的点线和带斜网络线的方框.新增的成员包括利用煤渣为原料的建材厂、CO<sub>2</sub> 气肥厂、双氧水厂和轻质碳酸钙厂.从图中可以看到一个更为复杂的工业生态系统.方案 3 面临的主要挑战是确定是否需要建立新成员和这些新成员的生产能力,对成员间的物料竞争进行平衡.

作者利用 LINGO 编制了各企业模块,并针对 3 个方案构造了各自的连接模型.对各方案的 MINLP 模型进行模拟和优化.以方案 3 为例,模型共计 451 个变量,其中(0,1)整数变量 35 个,等式约束和不等式约束共计 151 个,其中非线性约束 88 个.在 P133 内存 32 M 的微机求解,耗时约 30 s.

优化结果可以给我们提供很丰富的信息,如网络的拓扑结构、物流的流量、每一个成员的利润等等.表 1 中列出了案例分析中主要的环境指标和经济指标的优化值:第 2、3 列的数据是与第 1 列数据的相对值.方案 2 的指标表明当成员间建立起更复杂的工业共生关系时,可以得到更多的经济和环境效益;方案 3 的数据与方案 2 相比,经济效益更明显,但也伴随着更大的经济风险.方案 3 的环境效益不如方案 2 那么明显,主要是由于新加入的成员导致对资源需求的增加.

表 1 枣庄 EIP 案例分析结果  
Table 1 Analysis result of the case study

Indicators	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3
Steam exchange (10 <sup>3</sup> t)	100.0	29.0	96.2
Slag exchange (10 <sup>3</sup> t)	12.7	-1.7	-0.8
Water resource used (10 <sup>3</sup> t)	2542.0	-1588.9	-1088.7
Coal resource used (10 <sup>3</sup> t)	113.2	-11.5	-0.2
CO <sub>2</sub> waste discharged (10 <sup>3</sup> t)	433.0	-32.8	-56.6
SO <sub>2</sub> waste discharged (10 <sup>3</sup> t)	520	-88	-88
Net annual economic benefit (10 <sup>4</sup> ¥)	5002.2	1077.2	7443.2
Incremental annualized fixed costs (10 <sup>4</sup> ¥)	0	0	1505.0

## 4 结论

对生态工业园区的设计和维护需要建立在定量分析的基础上.本文采用了面向对象的建模思想,使得开发的 EIP 模型具有良好的扩展性、可修改性、可重用性.逻辑表达式的引入增加了模型的表达能力.案例分析表明了该模型的有效性,应用该模型可对生态工业园区不同的集成策略进行优化计算.模型还可进一步补充以反映园区成员的退出或加入、环境目标的改变、新技术的出现、有关法规的变动,还有多变的市场等因素对工业生态系统的影响,对潜在的风险进行模拟和预测.

符号表:

<i>B</i> 副产物	<i>L</i> 下界	<i>p</i> 价格	<i>U</i> 上界
<i>E</i> 外界输入的能量	<i>N</i> 经济指标	<i>R</i> 原料	<i>W</i> 水
<i>f</i> 物流	<i>P</i> 产品	<i>r</i> 物流转换系数	<i>y</i> 0/1 整数变量
<i>I</i> 投资	<i>P</i> 产品产量向量	<i>S</i> 蒸汽;经济指标期望值	<i>α</i> 过程参数向量
上、下标			
<i>b</i> 购买的来自其它成员的废物	<i>j</i> 物流编号	<i>sp</i> 销售的产品	<i>x</i> 物流分支编号
<i>f</i> 物流	<i>N</i> 经济指标	<i>u</i> 成员编号	
<i>i</i> 物流编号	<i>r</i> 购买的新鲜原料	<i>v</i> 成员编号	
<i>inv</i> 投资编号	<i>sb</i> 销售的副产品或废物	<i>w</i> 排放废物	

## 参考文献：

- [1] Cohen-Rosenthal E, McGalliard T, Bell M. Designing Eco-industrial Parks: The North American Experience [DB/OL]. <http://www.cfe.cornell.edu/wei/EIDP/design.html>. 1998.
- [2] Raymond P C, Cohen-Rosenthal E. Designing Eco-industrial Parks: A Synthesis of Some Experience [J]. *J. Cleaner Production*, 1998, (6): 181–188.
- [3] Sascha Kranendonk. PALME: French Industrial Eco-parks [DB/OL]. <http://www.epe.be>. 1998.
- [4] Duchin F. Industrial Input–output Analysis: Implications for Industrial Ecology [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1992, (89): 851–855.
- [5] Bailey R. Designing Robust Industrial Ecosystems: A Systems Approach [DB/OL]. [http://www.srl.gatech.edu/people/reid/rb\\_thesis.html](http://www.srl.gatech.edu/people/reid/rb_thesis.html). 1997.
- [6] Koenig H E, Cantlon J E. Quantitative Industrial Ecology [J]. *IEEE Trans, On Sys. Man & Cyb. Part C: App. & Review*, 1998, (28): 16–28.
- [7] Smart Growth Network. Designing Industrial Ecosystems Tool [DB/OL]. <http://www.smartgrowth.org/lobrary/diet.htm>. 1998.
- [8] 王曙光. 最小排放社区有关问题的研究 [D]. 北京：清华大学. 1998. 55–64.
- [9] Lingo systems Inc. LINGO 联机帮助手册 [CP/DK]. 1999.
- [10] Raman R R, Grossmann I E. Relation Between MILP Modelling and Logical Inference for Chemical Process Synthesis [J]. *Computers Chem. Engng.* 1991, 15(2): 73–84.

## A MINLP Model of Eco-Industrial Parks

CHEN Ding-jiang, LI You-run, SHEN Jing-zhu, HU Shan-ying

*(Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)*

**Abstract:** The design and management of eco-industrial park (EIP) should be conducted based on quantitative analysis, for which the principles and methods are needed to be developed. By means of deterministic mathematical programming, a model for EIP decision is developed with an object oriented method in this paper. Logical proposition expressions are introduced into the model, so that the decision in the course of EIP design and management can be formulated as a mixed integer nonlinear programming (MINLP) problem. The model consists of two kinds of blocks: member models and connection models. These blocks form a modular architecture, by which EIP scenarios with different topological structure are represented. It is easy to expand, modify, reuse the EIP model, and can be used as the kernel model in EIP decision making. A case study of a prototype EIP in Zaozhuang City, China is illustrated. Three mass and energy integrated scenarios are studied. The MINLP model is solved by LINGO software.

**Key words:** eco-industrial park; MINLP model; LINGO software