

# 煤炭资源开发系统动态仿真研究

孙玉峰

(山东工商学院 管理科学与工程学院, 山东 烟台 264005)

**摘要:** 提出了基于系统动力学的煤炭资源开发系统动态仿真方法, 建立了动态仿真模型. 选取煤炭可采储量、原煤产量、工作面个数、新建工作面个数和报废工作面个数 5 个主要系统变量, 对模型进行了历史仿真检验. 并运用情景分析法对所建立的模型进行实证分析. 通过设定 3 个情景, 对某矿区进行了情景计算和政策实验. 研究表明, 所建立的模型方法是有效的和可信的, 模型可以作为一个“政策实验室”, 对矿区进行未来发展情况的仿真预测和政策分析.

**关键词:** 煤炭资源开发; 系统动力学 (SD); 仿真

**中图分类号:** F407.21      **文献标识码:** A

## Research on dynamic simulation of coal resources development system

SUN Yu-feng

(School of Management Science and Engineering, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005 China)

**Abstract** The dynamic simulation method on the coal resources development system based on the system dynamics was proposed and the dynamic simulation model was established. Five main system variables were chosen such as coal recoverable reserve, raw coal output, the number of working faces, the number of newly built working faces and the number of scrapped working faces to carry out the historic simulating checkout to the model. The method of scenario analysis was applied to carry out case study on the model. Scenario calculation and policy experiment were carried out on certain mining area by setting up 3 scenarios. The results indicate that this model is effective and credible, it can become a “policy laboratory” to simulate, forecast and analyze the future developing conditions of mining area.

**Key words** coal resources development; system dynamics (SD); simulation

煤炭资源是人类社会发展的重要战略资源, 其本质是一种不可再生资源, 具有耗竭性. 社会经济的飞速发展和煤炭资源的自有优势决定了人类对它的开发强度会愈来愈大, 尤其在我国的煤炭是主要能源, 开采强度和储量消耗更大, 20多亿 t 的高产量仍然未能缓解煤炭市场的紧张局面. 因此, 建立煤炭资源开发系统的动态仿真模型, 并通过所建模型的动态模拟, 研究煤炭资源开发系统的结构及运行机制, 提出科学合理的煤炭资源的开发方案, 具有重要意义. 系统动力学 (System Dynamics SD) 的理论与方法是麻省理工学院的 J. W. Forrester 教授于 20 世纪 60 年代创立的<sup>[1]</sup>. 系统动力学是研究反馈系统动态行为的计算机模拟方法, 它有效地把信息反馈的控制原理与因果关系的逻辑分析结合起来, 面对复杂的实际问题, 从研究系统的内部结构入手, 建立系统的模拟模型, 并对模型实施不同的政策方案, 通过计算机模拟展示系统的宏观行为, 寻求解决问题的准确途径<sup>[2]</sup>.

收稿日期: 2007-03-29 责任编辑: 柳玉柏

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70573064); 国家软科学研究计划资助项目 (2006GXQ3D154); 山东省社科规划研究项目 (05BJZ38); 山东省软科学研究计划资助项目 (B2006039)

作者简介: 孙玉峰 (1966-), 男, 山东莱阳人, 博士, 教授. Tel: 0535-6903575 E-mail: syfeng2004@tm.com

# 1 动态仿真模型的建立

## 1.1 建模思想

如何进行合理、适度及与环境友好的煤炭资源开发，对于煤炭资源可持续利用、最大限度的延长煤炭资源的使用年限、提高煤炭企业的投入产出比都具有重要意义。煤炭资源的开发与利用是一个涉及多个方面的复杂系统。系统动力学为研究煤炭资源开发系统的行为规律提供了有效手段。

系统动力学方法的建模步骤可大体分 5 步：①用系统动力学的理论、原理和方法对研究问题进行系统分析；②进行系统的结构分析，划分系统层次与子块，确定总体与局部的反馈机制；③建立数学、规范的模型；④以系统动力学理论为指导，借助模型进行模拟与政策分析，进一步剖析系统得到更多的信息，发现新问题，然后又反过来再改造模型；⑤检验评估模型<sup>[3]</sup>。系统动力学实质上是通过设置变速率方程对系统的一系列因果反馈回路进行动态模拟，从而定量系统的整体行为表现，可用数学方程表示为

$$y(t_i) = y(t_i - 1) + R(t_i) t_b \tag{1}$$

式中， $y(t_i)$ 为  $t_i$  时刻的数量； $y(t_i - 1)$ 为  $t_i - 1$ 时刻末的数量； $R(t_i)$ 为从  $t_i - 1$ 时刻末到  $t_i$ 时刻末的变化速率； $t_b$ 为间隔时间段。

一个变速率方程代表一个系统动力学基本单元，由这些基本单元串接起来就构成了系统动力学的全貌<sup>[4]</sup>。

## 1.2 模型结构设计

煤炭资源开发系统是一个典型的复杂巨系统，具有复杂性、动态性、非线性、不确定性和振荡性等特点<sup>[5]</sup>。针对煤炭资源开发系统的特点，结合建模的需要，选取煤炭可采储量、原煤产量和工作面个数 3 个关键变量作为模型的核心变量，在此基础上，选取若干辅助变量构建动态仿真模型<sup>[6]</sup>。煤炭资源开发系统的主要变量及其反馈作用关系如图 1 所示。

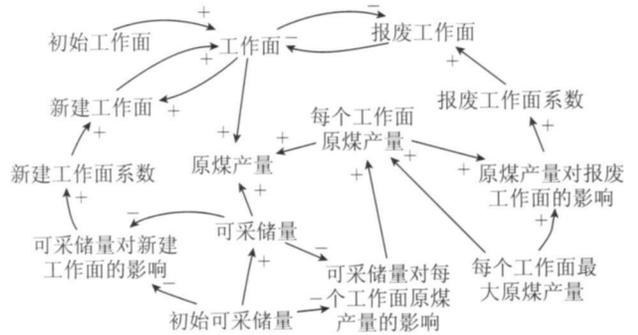


图 1 煤炭资源开发系统主要变量反馈关系

Fig. 1 Feedback relationship of central variables of coal resources development system

由图 1 看出，各变量之间存在着复杂的相互作用关系，其中即包括正相关关系，又有负相关关系。原煤产量由煤炭可采储量、工作面个数以及每个工作面原煤产量相互作用决定，工作面个数受新建工作面、报废工作面以及矿区初始工作面个数影响，每个工作面原煤产量由每个工作面最大原煤产量和可采储量对每个工作面原煤产量的影响决定。

在以上分析的基础上，运用系统动力学专用建模软件——Vensim Professional 建立如图 2 所示的煤炭资源开发系统动力学动态仿真模型<sup>[7-9]</sup>，对煤炭资源开发系统进行动态仿真研究。

## 1.3 模型的检验与输出

煤炭资源开发系统是十分复杂的，模型只是现实系统的抽象和近似。构建的模型能否有效地代表现实系统，直接决定模型仿真和政策分析质量的高低。因此，必须对模型进行有效性验证。模型的有效性检验一般有 2 种：即理论检验和历史仿真检验。理论检验主要研究模型边界是否合理，模型变量间的关系是否有现实意义，参数取值是否有实际意义及方程量纲是否一致等；历史仿真检验主要是选定过去某

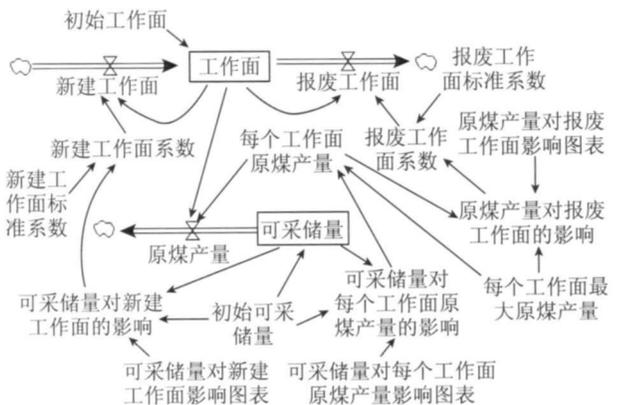


图 2 煤炭资源开发系统动力学动态仿真模型

Fig. 2 SD simulation model of coal resources development system

历史仿真检验主要是选定过去某

一时刻, 将仿真结果与实际结果相比照, 考察这两者是否吻合, 以验证模型是否能有效代表实际系统<sup>[10]</sup>.

以某矿为实证, 对所建立的模型进行有效性检验. 依据 SD 的建模原则和该矿的实际情况以及建模的目的, 认为所建立模型的系统边界是合理的, 模型变量之间的关系及参数取值都具有现实意义, 方程的量纲也是一致的. 所以, 认为模型通过了理论检验. 选择该矿区煤炭可采储量、原煤产量、工作面个数、新建工作面和报废工作面个数等指标 2000—2006 年的历史数据, 对模型进行历史仿真检验. 在检验过程中, 通过反复调整模型结构和模型中的可调参数, 使模型的行为更加接近实际系统, 最终检验结果见表 1.

表 1 历史仿真检验结果

Table 1 Checkout results of historical simulation

年份	可采储量 / 万 t	原煤产量 / 万 t	工作面 个	新建工作面 / (个 · a <sup>-1</sup> )	报废工作面 / (个 · a <sup>-1</sup> )	
历史值	2000	21 945.0	307.65	11	2	1
	2001	21 425.0	362.56	12	3	1
	2002	20 900.0	475.52	14	4	1
	2003	20 754.0	550.64	17	4	1
	2004	20 115.0	678.58	20	4	1
	2005	19 336.0	851.12	23	3	1
	2006	18 416.0	982.32	25	4	2
仿真值	2000	21 945.0	303.947	11.000 0	2.023 46	0.951 13
	2001	21 614.4	368.178	12.321 4	2.924 28	0.970 64
	2002	21 210.8	454.142	14.625 9	3.812 51	0.953 72
	2003	20 712.0	559.996	17.109 9	3.821 99	1.042 11
	2004	20 095.3	694.112	20.101 4	4.020 28	1.038 69
	2005	19 743.0	814.370	22.194 3	3.071 35	1.012 08
	2006	19 076.0	943.710	25.972 1	3.917 42	2.037 29
相对误差 / %	2000	0	- 1.218 3	0	+ 1.173 00	- 4.886 90
	2001	+ 0.884 0	+ 1.525 9	+ 2.678 33	- 2.524 00	- 2.936 00
	2002	+ 1.465 3	- 4.707 3	+ 4.470 71	- 4.696 25	- 4.628 00
	2003	- 0.202 8	+ 0.167 1	+ 0.646 47	- 4.450 20	+ 4.211 00
	2004	- 0.097 9	+ 2.237 7	+ 0.507 00	+ 0.507 00	+ 3.869 00
	2005	+ 2.061 5	- 4.513 2	- 3.630 21	+ 2.323 08	+ 1.193 58
	2006	+ 3.459 0	- 4.091 2	+ 3.742 86	- 2.108 02	+ 1.830 37

由表 1 看出, 所有模型的仿真值和历史值的相对误差均不超过 5%. 因此, 认为模型基本能够有效地代表现实的煤炭资源开发系统, 可以用来进行仿真, 并且可以预测该系统未来的发展情况. 模型通过有效性检验, 就可以进行模拟仿真. 图 3 是部分变量的模拟仿真结果, 仿真时间从 2000—2020 年, 仿真步长为 1 a. 由图 3 看出, 该矿区在 2007 年以前, 由于新建工作面的速度远大于报废工作面, 使矿区工作面的数量逐渐增加, 矿区处于稳定发展阶段. 所以, 矿区保持较高的发展速度, 原煤产量逐年增加. 而从 2007 年开始, 由于报废工作面的数量逐渐大于新建工作面, 使整个矿区工作面的数量逐渐下降, 原煤产量逐渐减少, 使矿区进入转型阶段, 煤炭可采储量逐渐减少, 发展速度减慢.

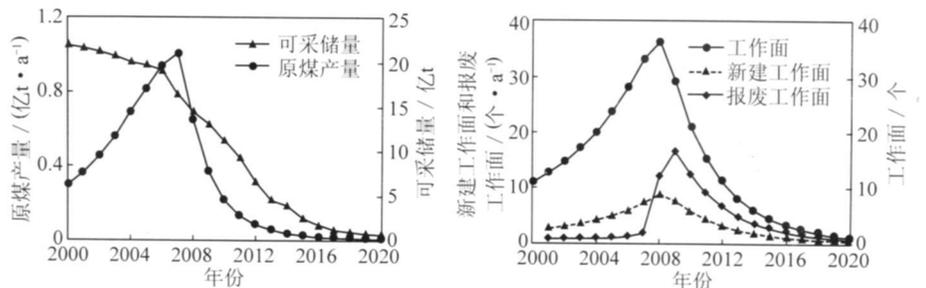


图 3 仿真结果

Fig. 3 Simulation results

## 2 情景分析与政策实验

### 2.1 情景设定

情景 1 基本行为模式. 根据该矿区的历史实际情况, 取新建工作面标准系数为 0.2, 报废工作面标准系数为 0.03, 每个工作面最大原煤产量为 45 万 t/a, 初始工作面和初始可采储量均选取 2000 年的历史值, 分别为 11 个和 21 945 万 t. 这是该矿区的历史发展模式.

情景 2 快速发展模式. 把新建工作面标准系数由 0.2 增加到 0.5, 报废工作面标准系数由 0.03 增加到 0.05, 每个工作面最大原煤产量由 45 万 t/a 增加到 50 万 t/a, 使矿区走快速发展的路子.

情景 3 适度发展模式. 新建工作面标准系数由 0.2 减小到 0.1, 报废工作面标准系数由 0.03 减小到 0.02, 保持情景 1 的其它各项指标不变.

### 2.2 情景计算与政策实验结果分析

3 个情景仿真的原煤产量结果 (其他变量的仿真结果略) 如图 4 所示. 由图 4 看出, 在情景 1 中, 矿区从 2007 年开始进入转型阶段, 矿区的原煤产量逐渐递减, 矿区的发展速度也逐渐减慢, 到 2020 年接近闭矿; 情景 2 表明, 从 2004 年开始进入转型阶段, 比情景 1 提前 3 a, 而且, 到 2014 年就进入闭矿阶段, 比情景 1 提前了 6 a, 矿区的服务年限大大缩短. 可见, 情景 2 无论对于矿区的经济效益还是社会效益都是不可取的; 情景 3 使该矿区的稳定发展阶段大大延长, 转型阶段可以延长至 2010 年, 矿区的服务年限增长, 而且, 矿区在整个发展过程中始终处于平稳发展的状态下, 这就大大地提高了矿区的经济效益和社会效益, 符合矿区复杂系统的演化模式与机理<sup>[11]</sup>. 情景分析和政策实验的结果表明: 情景 3 (即适度发展模式) 是该矿区的最佳发展模式. 所以, 该矿区应该依据仿真结果调整自己的发展战略, 走适度发展的可持续发展之路.

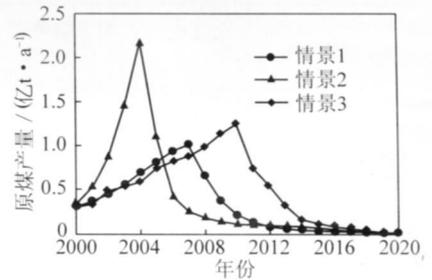


图 4 3 个情景仿真的原煤产量对比  
Fig 4 Contrast of raw coal output of three scenarios

## 3 结 论

(1) 提出了基于系统动力学的煤炭资源开发系统动态仿真方法, 建立了动态仿真模型. 通过实证分析认为, 所建立的模型方法是有效的和可信的, 能够充分代表现实的煤炭资源开发系统.

(2) 基于系统动力学的煤炭资源开发系统动态仿真模型, 可以作为一个“政策实验室”, 对矿区进行未来发展情况的仿真预测和政策分析, 为矿区制定正确的发展战略提供决策依据和政策参考.

### 参考文献:

- [1] Forrester JW. Industrial dynamics [M]. Cambridge: The MIT Press, 1961. 10~ 52.
- [2] Richardson G P, Pugh III A L. Introduction to system dynamics modeling with DYNAMO [M]. Cambridge: Productivity Press, 1981. 57~ 105.
- [3] Vensin. Ventana simulation environment (Reference manual) [M]. USA: Ventana System, Inc., 1995. 231~ 280.
- [4] 王其藩. 系统动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993. 98~ 163.
- [5] 孙玉峰. 我国矿区系统复杂性探析 [J]. 矿业研究与开发, 2006 (2): 18~ 19.
- [6] 孙玉峰. 矿产资源开发与利用系统动态仿真模型研究 [J]. 中国矿业, 2006 (3): 25~ 28.
- [7] Ventana. Version 5 user's guide [M]. USA: Ventana Systems, Inc., 1988. 98~ 152.
- [8] 陶在朴. 系统动力学——直击《第五项修炼》奥秘 [M]. 北京: 中国税务出版社, 2005. 184~ 208.
- [9] 王其藩. 复杂大系统综合动态分析与模型体系 [J]. 管理科学学报, 1999 (2): 15.
- [10] 王其藩. 社会经济复杂系统动态分析 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1992. 19~ 68.
- [11] 孙玉峰. 矿区可持续发展动态仿真方法研究——矿区复杂系统仿真设计 [M]. 北京: 经济管理出版社, 2006.