

# 基于熵的不同工业生产模式环境影响比较研究

楚海林, 李 军

(西南交通大学经济管理学院, 成都 610031)

**[摘要]** 从热力学出发, 分析了工业生产活动污染环境的熵本质, 提出了度量工业生产活动的环境影响非平衡态熵流模型, 并分别对三种不同生产模式的熵增值进行计算, 得到三种不同生产模式的环境影响趋势, 为可持续发展的生产模式的选择提供依据。

**[关键词]** 熵增; 环境影响; 生产模式; 可持续发展

**[中图分类号]** O414.19; X8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)10-0043-03

## 1 前言

工业是创造人类财富的支柱, 同时又是当前环境污染的主要源头。科学地评定工业生产的环境影响是当前可持续发展研究的一个重要内容。对于工业生产的环境影响评定, 目前还没有统一的指标和方法。常用的评价方法, 如环境影响评价 EIA, 主要以建设项目或区域开发对环境质量的影响为评价对象; 生命周期评价 LCA 是以产品为评价对象<sup>[1,2]</sup>。从系统热力学的观点看, 环境污染的实质是人类经济活动产生的过量熵增, 熵增越大, 对环境造成的影响越大<sup>[3]</sup>。因此可以根据工业生产过程中产生的熵增情况来度量工业生产对环境的影响。已有研究对工业活动的环境影响进行了热力学分析, 但缺乏定量研究<sup>[4]</sup>。笔者试通过对工业活动的熵增分析, 建立工业生产系统非平衡态熵流模型, 并依据模型对不同工业生产模式的熵增进行比较。

## 2 熵及工业生产的熵增

熵产生于热力学, 是由德国物理学家克劳修斯于 1865 年提出的。其内容是系统在一个微过程中, 从温度为  $T$  的热源中吸收的热量  $\Delta Q$  与  $T$  的比值,

定义为该系统在这个微过程中熵  $S$  的增量, 用公式表示就是  $\Delta S = \Delta Q/T$ 。在有限过程中熵的增加是:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \Delta Q/T$$
。自然界人类的一切活动都离不开能量的转移与转化, 热力学第一定律指出, 能量在转移与转化中, 其数量保持不变。同时, 热力学第二定律指出, 能量在转移与转化中, 部分能量不可避免地要从可用状态转变为不可用状态, 不可用能量的数值与这个过程中熵的增加成正比。于是, 熵成为宏观系统演化的判据。人类活动目的之实现, 无一不是以熵增加(消耗能量——能量从可用到不可用)为代价的。就是说, 能量在转移与转化中虽然在总量上是守恒的, 但这种转化在方向上是唯一的, 只能不可逆转地从高能位流向低能位, 即沿着对人类来说有效的到无效的、可利用的到不可利用的这一个方向转化。这就意味着工业生产在创造价值的同时, 也加速了熵的产生。因为人类的一切活动都离不开能量的转移与转化。而环境质量下降是补偿过量熵增的唯一方式<sup>[5]</sup>。

根据热力学理论, 一切有能量和物质流动的系统都是热力学系统<sup>[6]</sup>。工业生产系统是一个开放热力学系统, 其运行过程必然遵循热力学定律。按

**[收稿日期]** 2004-11-22; 修回日期 2005-03-09

**[作者简介]** 楚海林(1969-), 男, 甘肃兰州市人, 西南交通大学经济管理学院, 博士研究生, 研究方向: 决策分析; 李 军(1967-), 女, 四川资阳市人, 西南交通大学经济管理学院教授, 博士生导师, 研究方向: 物流工程、决策分析、博弈理论及应用等

照热力学定律,工业生产过程中,将能量和资源转化成产品,必然要产生熵增。正如槌田敦指出的<sup>[7]</sup>,所谓生产,是指从原料、资源制造产品的过程,用熵理论来表述,则是以产生高熵废料为代价而分离熵,来制造高度有序的低熵产品。工业生产过程是一个转换器,它将低熵的原料、能量转换成产品,同时产生高熵的废热和废弃物。

### 3 工业生产系统的熵增模型

#### 3.1 工业生产过程的熵变分析

对于任何一个开放热系统而言,熵能表示为

$$\Delta S = \Delta S_i + \Delta S_e \quad (1)$$

式中 $\Delta S$ 是状态函数熵; $\Delta S_i$ 是系统内部不可逆过程引起的熵变,也简称熵产生项; $\Delta S_e$ 是外界与系统之间物质和能量交换引起的熵变,也简称熵流项。

对于开放系统而言,根据热力学第二定律推出的熵增加原理:

$$\Delta S \geq 0 \quad (2)$$

当 $\Delta S > 0$ 时,系统处于不稳定状态;只有当 $\Delta S = 0$ ,热力学系统达到动态平衡状态。结合式(1)可知,动态平衡状态时

$$\Delta S_e = -\Delta S_i \quad (3)$$

由此可见,处于动态平衡的开放热力学系统,其内部熵产生与外部熵流项的符号相反,由于总是有 $\Delta S_i \geq 0$ ,所以处于定态的开放热力学系统总是

$$\Delta S_e \leq 0 \quad (4)$$

式(4)表明,若维持一个系统处于稳定的动态平衡状态,系统必须同外界有熵交换,吸收负熵或排出正熵,其大小与系统内部产生的熵增相等。对于工业生产系统,维持稳定、有序的组织结构,就必须在生产过程中向外界排放正熵,包括各种废弃物、工业垃圾等的同时,不断从外界吸收负熵,包括能源、原料、信息等,使总的熵变 $dS=0$ 。

#### 3.2 工业生产熵增模型

假设 $\Delta S_i(t)$ 为工业生产系统总熵变, $\Delta S_{il}(t)$ 为系统内部生产经营活动产生的熵变; $\Delta S_{el}(t)$ 为由物质和能量等的流进和流出所引起的熵变。这里 $\Delta S_{il}(t) = \Delta Q(t)/T(t)$ , $\Delta Q(t)$ 为生产活动产生的相当热量, $T(t)$ 是该过程的温度。工业生产系统在一定时间内(这里假设为1年),生产活动产生的总熵变为内部产熵变与外部交换熵流之和:

$$\Delta S_i(t) = S(t+1) - S(t) =$$

$$\Delta S_{il} + \Delta S_{el} =$$

$$\int_t^{t+1} \frac{E_m(\tau) + E_w(\tau)}{T} d\tau + \int_t^{t+1} \frac{\Delta S_{el}}{d\tau} d\tau = \frac{1}{T} \left[ \int_t^{t+1} E_m(\tau) d\tau + \int_t^{t+1} E_w(\tau) d\tau \right] + \int_t^{t+1} \frac{\Delta S_{el}}{d\tau} d\tau \quad (5)$$

式中, $E_m(\tau)$ 为生产过程的释放的总热量, $E_w(\tau)$ 为废弃物分解释放的热量。由中值定理得

$$\int_t^{t+1} E_m(\tau) d\tau = \sum_i \phi_{r,i} \cdot Y_i(t) - \sum_j \phi_{p,j} \cdot Y_j^N(t) \quad (6)$$

$$\int_t^{t+1} E_w(\tau) d\tau = \sum_k \phi_{w,k} \cdot W_k(t) \quad (7)$$

式中, $Y(t)$ 为工业生产的年总资源输入量; $Y^N(t)$ 为年净产出; $W(t)$ 为年废弃物总量; $\phi_{r,i}$ , $\phi_{p,j}$ , $\phi_{w,k}$ 分别为第*i*资源、第*j*产品和第*k*废弃物的折能系数(KJ/T); $t$ 表示时间间隔,以年为单位。于是得到工业生产系统一年内生产经营活动的总熵变:

$$\Delta S_i(t)_1 = \left[ \frac{1}{T} \left( \sum_i \phi_{r,i} \cdot Y_i(t) - \sum_j \phi_{p,j} \cdot Y_j^N(t) + \sum_k \phi_{w,k} \cdot W_k(t) \right) \right] + \Delta S_{el} \quad (8)$$

当工业生产系统处于稳定状态时, $\Delta S_{el}(t) = \Delta S_{il}(t)$ ,于是令 $\Delta S_i(t) = 0$ ,代入式(5),得到系统一年内向环境排放的总熵值:

$$\Delta S_{el}(t) = -\frac{1}{T} \left[ \sum_i \phi_{r,i} \cdot Y_i(t) - \sum_j \phi_{p,j} \cdot Y_j^N(t) + \sum_k \phi_{w,k} \cdot W_k(t) \right] \quad (9)$$

### 4 不同生产方式熵增比较

自可持续发展目标提出以来,已经出现了各种减少环境影响的生产模式。如末端治理方式、再循环生产、清洁生产模式等,不同工业生产模式对环境的影响并不相同。用以上熵增模型,分别对采取治理措施的传统工业生产模式、末端治理模式和清洁生产模式的熵增进行计算,分析不同工业生产模式的环境影响及可持续发展性。

工业过程包括生产过程和废弃物转化处理过程两个部分。为简化计算,假设生产只输入一种资源,生产一种产品,排放一种废弃物。根据文献<sup>[8]</sup>的研究结果,年总资源输入量、年净产出及年废弃物总量可表示如下:

$$Y(t) = \delta K_p(t) \quad (10)$$

式中 $\delta$ 为资金产出系数, $K_p(t)$ 为投入生产的资金。

年生产过程的资金增长比为

$$Y^N(t) = (1 - \epsilon_1) Y(t) \quad (11)$$

式中  $\epsilon_1$  为生产过程中废弃物产生系数,

$$W(t) = \epsilon_1 Y(t) + \epsilon_2 \eta K_P(t-1) \quad (12)$$

式中,  $\epsilon_2$  为废弃物处理过程中废弃物产生系数,  $\eta$  为废弃物转化处理比率。

由式 (9) 至式 (12) 得到生产系统的年熵增量表达式

$$\Delta S_{el}(t) = -\frac{1}{T} \{ \delta K_P(t)(1 + \Delta K)[\phi_r - \phi_p(1 - \epsilon_1) + \phi_w \epsilon_1] + \phi_w \epsilon_2 \eta K_P(t-1) \} \quad (13)$$

其中,  $\Delta K$  为资金增长百分比:

$$\Delta K = s(1 - \epsilon_1)\delta - I_w/K_P(t)$$

式中,  $s$  为利率,  $I_w$  为废弃物转化处理能力投资。

采用传统生产方式时, 既无末端控制投资, 又无实施清洁生产投资, 即  $I_w = 0$ ,  $\eta = 0$ 。

采用末端治理方式时, 对原有生产流程不改变, 只是在生产流程的最后, 进行专门投资, 添加废弃物处理工序。假设对废弃物转化能力的投资为生产资金占有额的 3%, 即  $I_w = 0.03 K_P$ , 并假设因此而导致 65% 废弃物得到处理和回收利用, 即  $\eta = 0.65$ 。

采用清洁生产方式时, 在整个生产过程中, 考虑环境影响, 尽量减少甚至不产出废弃物, 因而不需要废弃物处理和回收的专门投资,  $I_w = 0$ ,  $\eta = 0$ 。同时假设生产过程中每单位产出中的废弃物每年以固定比率  $\tau$  减少, 则废弃物产生系数  $\epsilon_1$  变为  $\epsilon_1(1 + \tau)^t$ , 设  $\tau = 0.02$ 。

根据式 (13), 对三种生产方式的熵增值进行仿真计算, 取若干初始值  $K_{P1} = 5$ ,  $s = 0.2$ ,  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0.1$ ,  $\delta = 0.5$ , 时间取 30 年, 计算结果如图 1 所示。

## 5 分析与结论

从仿真结果可以看出, 传统生产方式, 熵增的速度增长很快, 对环境的威胁极大; 末端治理方式对环境的影响有所改善, 但尚不符合可持续发展的要求; 清洁生产方式, 熵增速度最小。从系统热力学的观点看, 三种生产模式中, 清洁生产模式符合可持续发展的要求。从热力学角度分析, 末端治理方式虽然对废弃物进行了治理, 但因为其治理过程本身也是一种热力学过程, 同样要消耗资源和产生废弃物。而清洁生产方式是实行污染全程控制, 在

生产过程中就减少甚至杜绝了废弃物的产生, 因此, 清洁生产方式的熵增最小。

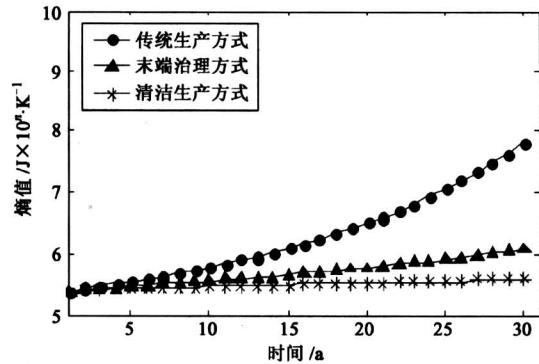


图 1 熵增计算结果

Fig.1 The result of entropy increase calculate

熵可以作为评价工业生产系统环境影响的一个指标。通过工业生产系统的熵增计算, 可以衡量工业生产的环境影响大小。用非平衡态熵流模型描述工业生产活动的环境影响, 是从环境污染的热力学本质上揭示工业系统生产对环境的影响。根据熵增加原理, 只要从事某种活动, 熵就增加。但人们可以通过优化决策和科学技术改进生产模式, 最大限度地减少熵增, 保护环境。工业生产的熵增研究可以为工业生产环境影响评价提供补充, 为工业生产的可持续发展提供决策依据。

## 参考文献

- [1] Rebitzer G, Ekvall T, et al. Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications[J]. Environment International, 2004, 30 (5): 701~720
- [2] Daniel Stavros E, Tsoulfas Giannis T. Aggregating and evaluating the results of different Environmental Impact Assessment methods [J]. Ecological Indicators, 2004, 4 (2): 125~138
- [3] Tomas Kaberger, Bengt Mansson. Entropy and economic processes—physics perspectives [J]. Ecological Economics, 2001, 36: 165~179
- [4] 王承阳. 环境污染末端治理的热力学认识 [J]. 冶金能源, 2003, 22 (6): 52~54
- [5] Svirezhev Y M, Hopkins A S. Sustainable biosphere: critical overview of basic concept of sustainability[J]. Ecological Modelling, 1998, 106: 47~61
- [6] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1992. 76~81

(下转第 94 页)

工具对其他设备的网络驱动开发和测试也具有一定的参考价值。

#### 参考文献

- [1] 魏永明, 骆刚. Linux 网络驱动程序, 第二版 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002
- [2] Hinds D. Linux PCMCIA Programmer's Guide [DB/OL]. <http://pcmcia-cs.sourceforge.net>, 2003-01-22
- [3] LMSC of the IEEE Computer Society. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [S]. IEEE Standard 802.11, 1999
- [4] 毛操德, 胡希明. Linux 内核源代码情景分析 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001
- [5] 苗启广, 杨思燕. 基于 Linux 的 ATM 网卡驱动程序研究与实现 [J]. 计算机工程, 2004, (4): 55~56, 177

## Design and Developing of the Network Device Driver on Embedded Access Point

Wang Zhili, Hu Aiqun, Song Yubo

(Research Center of Information Security, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] This paper systematically introduces the main structure of network device driver based on embedded Linux. With the PCMCIA API, the software modules of embedded AP (access point) and the developing course are stressed. The testing results of the network device driver are given at the end of the paper.

[Key words] embedded linux; network device driver; PCMCIA

(上接第 45 页)

- [7] 槌田敦(日). 资源物理学 [M]. 朴昌根译. 上海: 华东工业学院出版社, 1991. 32~36
- [8] 汪应洛, 刘旭. 清洁生产 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 39~40

## Study on Environmental Effect Under Different Industrial Production Modes Based on Entropy

Chu Hailin, Li Jun

(School of Economics & Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

[Abstract] The impropriety industrial production mode is one of the main causes of environmental pollution. From thermodynamics, this paper analyses the entropy essential of the pollution of industrial production. On the basis of this, a dynamic equilibrium entropy flow model is set up to measure the infection of industrial production to the environment. Taking three production modes for example, the entropy increase quantity is calculated by using the model and the environmental effect trends can be deduced. It can provide decision-making basis for choice of sustainable production mode.

[Key words] entropy increase; environmental effect; the industrial production mode; sustainable development