

基于 LCA 垃圾焚烧发电厂经济性分析的系统动力学模型*

房科靖^{1,2,3}, 熊祖鸿^{1,2,3†}, 鲁敏^{1,2,3}, 郭华芳^{1,2,3}, 李继青^{1,2,3}

(1. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640; 2. 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;
3. 广东省新能源和可再生能源研究开发与应用重点实验室, 广州 510640)

摘要: 生活垃圾焚烧发电厂的经济性是政府部门和投资企业双方的决策基础和依据, 直接影响到双方的利益。目前, 垃圾焚烧发电厂经济性的分析预测主要根据项目的历史数据和经验值进行估算和决策, 并没有考虑项目整个生命周期内资金的持续投入。本文基于生命周期评价(LCA)分析方法, 结合系统动力学理论, 构建生活垃圾焚烧发电厂经济性分析的系统动力学模型, 并以某地区 2000 t/d 的焚烧发电厂为实例进行分析, 充分考虑了其全生命周期过程的资金投入情况。结果表明: 上网电价提高或降低 0.1 元/kW·h 对净利润的影响要大于每吨垃圾处理补贴提高或降低 10 元对净利润的影响; 每吨垃圾处理补贴提高或降低 20 元相当于上网电价提高或降低 0.1 元/kW·h。

关键词: 生命周期评价; 系统动力学; 经济性分析; 垃圾焚烧发电厂

中图分类号: TK6

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2017.05.007

System Dynamics Model for Economic Analysis of Waste Incineration Power Plant Based on LCA

FANG Ke-jing^{1,2,3}, XIONG Zu-hong^{1,2,3}, LU Min^{1,2,3}, GUO Hua-fang^{1,2,3}, LI Ji-qing^{1,2,3}

(1. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou 510640, China;

3. Guangdong Provincial Key Laboratory of New and Renewable Energy Research and Development, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The economic performance of municipal solid waste incineration power plants is the basis for the decision-making of government departments and investment enterprises, and directly affects the interests of both sides. At present, the economic analysis and prediction of the waste incineration power plant are mainly based on the historical data and empirical values of the project, and it does not take into account the continuous investment in the whole life cycle of the project. In this work, based on the life cycle assessment (LCA) analysis method and the system dynamics theory, a system dynamics model was built for the economic analysis of the MSW incineration plant. The model taking an incineration power plant with capacity of 2000 t/d as an example, the analysis was carried out by giving full consideration to the capital input in the whole life cycle process. Results showed that: a feed-in tariff increased or decreased by 0.1 RMB/kW·h, the impact on the net profit was greater than that brought by the subsidy fluctuation of 10 RMB for per ton garbage treatment. The subsidy to deal with each ton garbage should be raised to 20 RMB that could be equivalent to the feed-in tariff's adjusting by 0.1 RMB/kW·h.

Key words: life cycle assessment; system dynamics; economic analysis; waste incineration power plant

0 引言

随着全球人口的不断增长、社会生产力的快速发展、生活水平的不断提高, 人们在生产生活过程中的废弃物产生量也越来越大。据统计, 我国城市垃圾年产量超过 1.4 亿 t, 占世界城市垃圾总产生量

的 26.5%, 并且城市垃圾量正以 8%~10% 的年增长率不断增加^[1-2], 2/3 的城市已形成了垃圾包围城市的严重局面, 全国垃圾累计占地达 5.4 亿 m²^[3]。一直以来, 填埋处理是我国废弃物处理的主要手段, 以填埋为主的生活垃圾处理方式正在与人们抢占宝贵的土地。全球资源的短缺和可持续发展思想的

* 收稿日期: 2017-05-31 修订日期: 2017-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(21606228)

† 通信作者: 熊祖鸿, E-mail: xiongz@ms.giec.ac.cn

提出,使人们不仅仅将城市生活垃圾视为一种污染物,而是渐渐地将其作为一种可再生利用的宝贵资源^[4]。生活垃圾的焚烧处理是一种行之有效的减量化和资源化处理方式,对解决“垃圾围城”这一难题具有积极作用,且符合我国循环经济发展要求,逐渐成为大中型城市主要的垃圾处理方式^[5]。

垃圾焚烧发电项目具有投资大、回收周期长、技术复杂、运营成本高特点;前期的资金投入主要包括厂址的土地使用费、基础设施的建设费、生产和安装设备的费用、运营和维护的费用以及人力资源费用。后期主要的资金收入包括政府补给的垃圾处理补贴费和出售的发电量。

项目的经济性是政府部门和投资企业双方的决策基础和依据,直接影响到双方的利益,如果项目收益预测出现较大的偏差,使得投资企业获得暴利或者无法实现预期的收益,从而导致社会利益受损或者项目失败。因此,科学预测项目的经济性对保障项目成功运作具有重要的指导意义。

有关项目收益的预测方法主要有净现值(net present value, NPV)法、蒙特卡罗模拟法、实物期权法。SHEN等^[6]构建了政府和投资公司收益均衡条件下的NPV模型,并分析了风险校正对收益的影响。THOMAS等^[7]进一步设计出项目公司收益和经营年限的随机模拟流程,并模拟出实现项目收益的累积概率。WIBOWO^[8]构建了不同政府担保条件下的期权模型,并采用超立方取样(Latin hyper-cube sampling, LHS)抽样法求解项目收益。

目前,针对垃圾焚烧发电厂经济性的预测主要根据项目的历史数据和经验值进行估算和决策,只考虑到前期设备的投入,没有考虑项目整个生命周期资金的持续投入、后期的运行维修以及报废回收。因此,本文基于LCA分析方法,充分考虑全生命周期内的资金投入,并结合系统动力学理论,构建生活垃圾焚烧发电厂经济性分析的系统动力学模型,进行实例分析。

1 理论和方法

1.1 生命周期评价方法

生命周期评价(life cycle assessment, LCA)的定义主要分为两种。一种是国际环境毒理学和化学学会(Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC)定义:通过识别和量化所有资源、

能源消耗以及由此产生的环境排放,来客观评价一个产品、过程或活动的环境负荷的方法。另一种是国际标准化组织定义:汇总和评估一个产品(或服务)体系在其整个生命周期中的所有投入及产出对环境造成的潜在影响的方法^[9]。

生命周期评价是产业生态学的主要理论基础和分析方法,如今在产品及产品系统、工业代谢分析和生态工业园建设等领域都得到了广泛应用。LCA已被认定为21世纪最具潜力的可持续发展支持工具^[10]。

1.2 系统动力学理论

系统动力学(system dynamics, SD)是系统科学理论与计算机仿真紧密结合、研究系统反馈结构与行为的一门科学,是系统科学与管理科学的一个重要分支。

系统动力学认为,系统的行为模式与特征主要取决于其内部的结构。反馈是指 X 影响 Y , Y 通过一系列的因果链反过来影响 X ;我们不能孤立地分析 X 与 Y 或 Y 与 X 的联系来分析系统最终的行为,只有把整个系统作为一个反馈系统才能得出正确的结论。

根据LCA评价方法,充分考虑焚烧发电厂全部资金投入过程,并运用系统动力学构建内部各变量的反馈关系,将LCA与SD有机结合,并建立系统分析模型。

2 模型构建

焚烧发电厂的收益情况主要涉及生产制造阶段、建设与运行维护阶段、最后处置阶段的资金投入,还与政府补给的垃圾处理补贴费、出售的发电量、上网的电价等多个变量有关^[11-12],变量之间存在着联系,属于非线性的反馈关系,可以用系统动力学方法对其建立经济性分析模型。

项目的收益主要取决于资金投入与资金收入的关系,因此,本文将项目的收益分为资金投入和资金收入两个子系统。

2.1 资金投入子系统

考虑生活垃圾焚烧发电厂的全生命周期内,资金投入子系统主要包括生产制造阶段、建设与运行维护阶段、最后处置阶段的费用。生产制造阶段包含垃圾接收贮存系统、垃圾焚烧系统、余热利用系统和烟气净化系统的费用,这些费用取决于垃圾处理量,资金投入子系统见图1。

3 模型描述

将系统模型中的变量分为水平变量、速率变量、辅助变量和常量，通过系统动力学软件 (Vensim) 的公式编辑器为模型中的每个变量赋予数学方程式。

3.1 确定变量

将系统模型中的变量分为水平变量、速率变量、辅助变量和常量，系统包括 1 个水平变量、1 个速率变量、6 个常量、13 个辅助变量，共 21 个变量。

水平变量：资金收入；

速率变量：资金增长量；

常量：垃圾处理量、上网电价、每吨垃圾处理

补贴费、建设成本、维护成本、人力资源成本；

辅助变量：垃圾接收贮存系统、垃圾焚烧系统、余热利用系统、烟气净化系统、生产制造阶段费用、运营成本、建筑和运行维护阶段费用、最后处置阶段费用、资金投入、净收益、发电量、上网发电收入、垃圾处理补贴费。

3.2 赋予数学方程式

在模型的建立过程中，需要对系统内部的变量赋予数学方程式；赋予数学方程式的过程中，参数的选择和确定是比较重要的一步，参数通常包括表函数、常量以及初始值等。本文主要变量的数学方程式见表 1。

表 1 主要变量的数学方程式

Table 1 Mathematical equations of major variables

变量类型	变量/单位	方程及参数
辅助变量	净收益/万元	资金收入-资金投入
	资金投入/万元	建筑和运行维护阶段费用+最后处置阶段费用+生产制造阶段费用
	上网发电收入/万元	上网电价×发电量
	垃圾处理补贴费/万元	垃圾处理量×每吨垃圾处理补贴费
	建筑和运行维护阶段费用/万元	建设成本+运营成本
	运营成本/万元	人力资源成本+维护成本
	生产制造阶段费用/万元	余热利用系统+垃圾接收贮存系统+垃圾焚烧系统+烟气净化系统
水平变量	资金收入/万元	积分 (资金增长量, 0)
速率变量	资金增长量/(万元/年)	上网发电收入+垃圾处理补贴费

4 模拟分析

4.1 案例分析

表 2 项目的主要参数

Table 2 Main parameters of the project

项目	单位	指标
垃圾处理量	t/a	73 万
余热锅炉蒸发量 MCR 设计点	t/h	55.91×3
装机容量	MW	18×2
年运行时间	h	8000
总发电量	kW·h/a	2.576×10 ⁸
上网电量	kW·h/a	2.19×10 ⁸
厂用电率	%	15
全厂定员	人	102
工程总投资	万元	48901.03

某地区为了进一步做好城市垃圾的处理工作，决定建设日处理能力为 2000 t (每年 13 万 t) 的生活垃圾焚烧发电项目，垃圾处理补贴费为 95 元/t，上网电价为 0.65 元/kW·h，维护成本为项目资金投入的 5%，人力资源成本为 270 万元/年，项目的主要参数见表 2。

4.2 模型仿真方案设计与分析

通过调控变量的数值，进行模型仿真方案的设定，调控变量主要选取模型中的因变量；因此，本文选定每吨垃圾处理补贴费和上网电价为调控变量，初始值分别为 95 元/t 和 0.65 元/kW·h。

调整每吨垃圾处理补贴费，由 95 元/t 降到 85 元/t 或升高到 105 元/t，上网电价由 0.65 元/kW·h 降到 0.55 元/kW·h 或升高到 0.75 元/kW·h，其中模式一为初始值。

表 3 变量参数设定

Table 3 Variable parameters setting

模式	垃圾处理补贴费/(元/t)	上网电价/(元/kW·h)
一	95	0.65
二	85	0.65
三	105	0.65
四	95	0.55
五	95	0.75
六	85	0.75
七	105	0.55

4.3 模拟结果输出与分析

根据设计的七种模式，将变化的参数输入到建立的经济性分析模型中，通过 Vensim 模拟软件，分别进行模拟仿真，得出运行的结果，详见图 4 和表 4。

通过图 4 和表 4 可以看出，模式一为初始值，模式二为每吨垃圾处理补贴费降低了 10 元，且上网电价不变；模式四为上网电价降低了 0.1 元/kW·h，每吨垃圾处理补贴费不变；通过模式一与模式二、模式一与模式四的比较可知，上网电价降低 0.1 元/kW·h 对净利润的影响要大于每吨垃圾处理补贴费降低 10 元对净利润的影响，到第三年的净利润，模式二为模式四的 1.55 倍；模式六为每吨垃圾处理补贴费降低了 10 元，上网电价升高了 0.1 元/kW·h，综合

效果，提高了净利润，从第 3 年的净利润来看，模式六为模式一的 1.3 倍；相反，模式七为每吨垃圾处理补贴提高了 10 元，上网电价降低了 0.1 元/kW·h，综合效果，降低了净利润。从第 3 年的净利润来看，模式七为模式一的 91.03%；模式三与模式六、模式四与模式七最终的净利润相差不大，即每吨垃圾处理补贴提高或降低 20 元相当于上网电价提高或降低 0.1 元/kW·h。综上所述，上网电价提高 0.1 元/kW·h，同时每吨垃圾处理补贴降低 10 元，最终的净利润是提高的，即上网电价提高或降低 0.1 元/kW·h 对净利润的影响要大于每吨垃圾处理补贴提高或降低 10 元对净利润的影响。

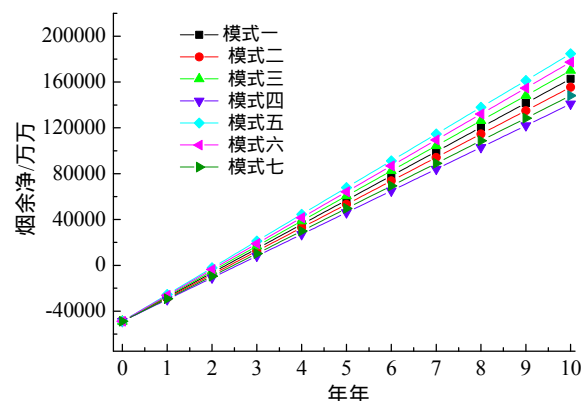


图 4 不同模式下净利润的变化图

Fig. 4 Changes of net profit in different modes

表 4 不同模式下净利润的变化数据表

Table 4 Data for changes of net profit in different modes

年份	净利润/万元						
	模式一	模式二	模式三	模式四	模式五	模式六	模式七
0	-48901	-48901	-48901	-48901	-48901	-48901	-48901
1	-27731	-28461	-27001	-29921	-25541	-26271	-29191
2	-6561	-8021	-5101	-10941	-2181	-3 641	-9481
3	14609	12419	16799	8038	21179	18989	10229
4	35779	32859	38699	27019	44539	41619	29939
5	56949	53299	60599	45999	67899	64249	49649
6	78119	73739	82499	64979	91259	86879	69359
7	99289	94179	104399	83959	114619	109509	89069
8	120459	114619	126299	102939	137979	132139	108779
9	141629	135059	148199	121919	161339	154769	128489
10	162799	155499	170099	140899	184699	177399	148199

5 结 论

本文基于 LCA 分析方法,并结合系统动力学理论,构建出生活垃圾焚烧发电厂经济性分析的系统动力学模型,该模型所选取的参数取自目前行业的平均值,适用于大多数此类型的垃圾焚烧发电厂;并以某地区 2000 t/d 的生活垃圾焚烧发电厂对建立的模型进行实例分析,结果表明:上网电价提高或降低 0.1 元/kW·h 对净利润的影响要大于每吨垃圾处理补贴提高或降低 10 元对净利润的影响;每吨垃圾处理补贴提高或降低 20 元相当于上网电价提高或降低 0.1 元/kW·h。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴(1998 年)[M]. 北京: 中国统计出版社, 1999.
- [2] WANG H T, NIE Y F. Municipal solid waste characteristics and management in China[J]. Journal of the air & waste management association, 2001, 51(2): 250-263. DOI: 10.1080/10473289.2001.10464266.
- [3] 王伟, 袁光钰. 我国的固体废物处理处置现状与发展[J]. 环境科学, 1997, 18(2): 87-90. DOI: 10.13227/j.hjcx.1997.02.026.
- [4] 徐成, 胡聃. 城市生活垃圾的生命周期管理[J]. 中国人口·资源与环境, 1999, 9(2): 56-60.
- [5] 方源圆, 周守航, 阎丽娟. 中国城市垃圾焚烧发电技术与应用[J]. 节能技术, 2010, 28(1): 76-80. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6339.2010.01.020.
- [6] SHEN L Y, LI H, LI Q M. Alternative concession model for build operate transfer contract projects[J]. Journal of construction engineering and management, 2002, 128(4): 326-330. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:4(326).
- [7] NG S T, XIE J Z, CHEUNG Y K, et al. A simulation model for optimizing the concession period of public-private partner-ships schemes[J]. International journal of project management, 2007, 25(8): 791-798. DOI: 10.1016/j.ijproman.2007.05.004.
- [8] WIBOWO A. Valuing guarantees in a BOT infrastructure project[J]. Engineering, construction and architectural management, 2004, 11(6): 395-403. DOI: 10.1108/09699980410571543.
- [9] 陆钟武. 工业生态学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 145-146.
- [10] 樊庆铨, 敖红光, 孟超. 生命周期评价[J]. 环境科学与管理, 2007, 32(6): 177-180. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2007.06.049.
- [11] ZHANG X Q. Win-win concession period determination methodology[J]. Journal of construction engineering and management, 2009, 135(6): 550-558. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000012.
- [12] SHEN L Y, BAO H J, WU Y Z, et al. Using bargaining-game theory for negotiating concession period for BOT-type contract[J]. Journal of construction engineering and management, 2007, 133(5): 385-392. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2007)133:5(385).

作者简介:

房科靖(1990-),男,硕士,助理研究员,主要从事废物资源化、能源化利用技术等方面的研究。

熊祖鸿(1975-),男,高级工程师,主要从事无机固体废物资源化利用研究。