

4MW e 生物质气化内燃机 – 汽轮机联合循环发电系统的燃料费用模型

贾友见¹, 余志², 吴创之³

(1. 昆明理工大学理学院, 云南昆明 650093 2. 中山大学智能交通研究中心, 广东广州 510275;

3. 中国科学院广州能源研究所, 广东广州 510275)

摘要: 基于 4MW e 生物质气化燃气内燃机 – 汽轮机联合循环发电系统生物质燃料供给链, 建立燃料费用模型, 并以稻草为例估算燃料费用, 认识燃料费用的主要构成, 讨论生物质电厂容量规模对燃料费用的影响。

关键词: 生物燃料; 费用模型; 电力费用; 规模效益

中图分类号: TK-9 TM611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2010)03-0067-04

Fuel Cost Model for 4MW e Biomass Gasification Gas Engines and Steam Turbine Combined- Cycles Power System

JIA You-jian¹, YU Zhi², WU Chuang-zhi³

(1. Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2. Research Center of Intelligent Transportation System, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

3. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510275, China)

Abstract A fuel cost model is developed based on the fuel feed chain of 4MW e biomass integrated gasification gas engine and steam turbine combined- cycles (BIG/GasEng- STCC) power system. Rice straw is taken as an example to study the main elements and to discuss the scale effect of biomass power plant on fuel cost

Key words bio- fuel; cost model; cost of electric power; scale benefit

0 引言

生物质能源的优化利用就是要以最小的费用, 最大化可用能产出。生物质发电系统的费用取决于许多参数, 如燃料的费用、系统转换效率、规模因子等。与化石燃料相比, 生物质资源虽然丰富, 但由于受地理位置和运输能力的限制, 其资源的可获得性相对有限, 燃料价格相对较高, 成为目前影响生物质作为能源利用的关键因素之一。

许多研究人员对生物质燃料的供给费用问题进行了研究^[1-7]。A sika inen^[2]等人假设生物质燃料的价格仅受收集费用和运输距离的影响, 研究表明, 生物质电厂的容量规模是影响生物质燃料价格的一个重要因素, 电厂容量越大, 所需燃料的价格就越高, 但认为价格仅受运输费用的影响。Veronika 和 Faa ij^[3]分别对采用燃烧和气化技术的生物质热电联产系统进行了技术经济评价。上述文献的研究对象多是大规模生物质电厂(容量在 500MW e 左右), 目前这类系统还缺少实际工程背景, 且多属于定性研究。此外, 上述研究中隐含的两个假设是生物质燃料本身是没有价值的“废弃物”, 燃料价格不受市场供给关系的影响。

收稿日期: 2009-06-26 基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)资助课题(2001AA51001Q 2003AA514010); 中山大学资助课题(KKK0200507099)。

作者简介: 贾友见(1966-), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 能源系统工程。E-mail: jiayoujian@163.com

响. 以稻草燃料为例, 在一些国家或地区, 稻草资源十分丰富, 过去通常采用野外燃烧的办法处理这些废弃物, 然而近年来, 由于焚烧造成严重的空气污染, 野外燃烧逐渐被禁止, 农场主处理这些废弃物的费用不菲; 一些林场或者锯木场, 常常有一些林业废弃物和木屑等, 通常情况下这些副产品的外运和处理的费用也较高. 上述情形下, 这些生物质可以被认为没有附加价值“废弃物”, 如果考虑到原料的竞争使用, 情况则会有所不同.

吴创之等人^[4]依据现有的实际工程状况, 曾对我国自行研制的 1.0MW e 生物质气化发电系统的经济性作了一般性评述. 据作者所查阅到的文献, 目前我国还缺少详尽、较为准确的生物质资源及费用估算资料. 事实上, 在许多国家或地区, 也同样存在这些问题^[3]. 生物质燃料的费用和生物质电厂的经济效益与电厂所处的地理位置有关, 有很大的不确定性.

本项研究基于中国科学院广州能源研究所开发的 4MW e 生物质气化燃气内燃机 - 汽轮机联合循环发电系统 (后简称 4MW e 生物质发电系统) 项目, 它是在前期成功设计并示范运行的 1.0MW e 和 1.2MW e 生物质气化发电系统的基础上, 自行研制的中等规模生物质气化联合循环发电系统. 该系统采用了流化床气化炉、焦油高温裂解除焦及其它气体净化工艺和燃气内燃机 - 汽轮机联合循环发电新技术, 文献 [5] 对该系统进行了详细描述.

1 燃料费用模型

假设发电厂使用的燃料是农业残余物 —— 稻草. 准确估算把稻草从农田运输至电厂所需要的费用是一项很困难的工作. 稻草的最终费用由稻草收购价格、运输费用、保管和预处理费用等组成.

电厂通常采用分批、分区方式收购稻草. 根据我国的情况, 电厂附近 (1 km 左右) 农户直接运送稻草到电厂, 而距离电厂较远的村落, 一般是由农民用拖拉机运送到保管点, 再由电厂卡车运送到电厂. 运输费用不仅取决于路网和道路状况, 还与当地劳动力供给、运输车辆选择等因素有关. 为了给出一个一般的费用估算方法, 假设运输车辆采用 1 t 卡车, 相对于拖拉机分散运输, 这是一个保守的估计. 运输费用由运输油耗费用和车辆固定费用组成, 前者是运输距离和运量的函数.

假设电厂位于稻谷主产区之一的地理中心, 稻草收集区呈圆形, 如图 1 所示.

假设该地区仅有 $1/n$ 的面积用于稻谷种植, 年产两季稻谷. 稻草平均产量为 $(t/km^2, 13\%$ 干基), 可以收集用作发电燃料的比例为 λ 其余部分不被收集或作它用.

稻草实际收集面积 $A (km^2)$ 和稻草量需求量 $D (t, 15\%$ 干基) 之间有

$$A = D / (\lambda \bar{Y}) \tag{1}$$

假设收集地理面积为 $S (km^2)$, 则

$$S = n \times A \tag{2}$$

则实际收集地理半径 $R (km)$ 为

$$R = (S/\pi)^{0.5} = (nA/\pi)^{0.5} = (nD/\pi\lambda\bar{Y})^{0.5} \tag{3}$$

稻草运输费用 C_r (元) 为:

$$C_r = e_{tr} \int_0^R r \cdot dD = e_{tr} \int_0^R r \cdot \left((\bar{Y}\lambda/n) dS \right) = e_{tr} \int_0^R (\bar{Y}\lambda \cdot 2\pi r^2/n) dr = \frac{2\pi\bar{Y}\lambda R^3}{3n} e_{tr} \tag{4}$$

其中: r 是收集地理半径, e_{tr} 是单位运输费用 (元 / (t · km)). 平均运输费用 \bar{e}_{tr} (元 / t) 为:

$$\bar{e}_{tr} = \frac{C_r}{D} = \frac{2}{3} R e_{tr} \tag{5}$$

假设发电厂使用的燃料是农业残余物 —— 稻草, 地点位于我国主要的稻谷产区之一, 稻草资源丰富. 稻草的收集价格中, 除包括农民从田间收集并送到收集站的收集费用外, 还包括了附加的增值收益, 即把

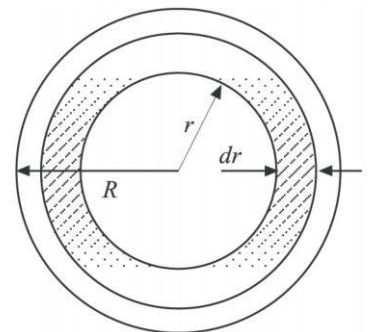


图1 生物质燃料收集区域和运输距离估算
Fig.1 Biomass fuel collecting area and transportation distance estimation

稻草作为一种商品来进行交易, 这更符合我国的实际情况。

稻草收购价格与电厂容量之间反映的是市场供求关系, 通常不容易定量确定这种关系. 由于各地经济状况和劳动力价格差别较大, 以及受稻草竞争使用的影响, 稻草价格有很大的差异. 根据我们的调查和统计, 本文采用的稻草收购价格为 $\text{¥}140/\text{t}$ 取自 4MW e 发电厂的建设预算表。

稻草的含水率与稻谷的品种和收获季节有关, 通常在田间收割后自然干燥至 17% 以下, 以防止捆扎、码堆储存时, 由于微生物活动导致燃料腐烂变质. 假设收购的稻草干基含水率是 13%, 低位热值 IHV 为 $13.4\text{MJ}/\text{kg}$ 谷物和稻草的比例按照 1:1 计算^[6]。

依据文献 [7] 统计资料, 以广东省 6 个主要稻谷产区 (澄海, 吴川、揭东、潮阳, 开平、潮安) 为例, 稻谷种植面积与地理面积之比为 1:6.5 全省 76 个地区的稻谷平均产量为 $6.25\text{t}/\text{hm}^2$, 其中 6 个主要产区的稻谷平均产量为 $6.70\text{t}/\text{hm}^2$, 本文采用 $6.50\text{t}/\text{hm}^2$ 作为稻谷估算产量, 稻草可获得性按 40% 估算。

表 1 是稻草燃料的费用估算表, 根据 4MW e 发电厂建设预算表制作, 其中车辆和油耗费用以 2004 年估计的采购价格为基准估算. 最后我们用 Excel 表格将所有费用均转换成以每吨燃料 (干基, 13% 含水率) 为基准的费用, 并将容量规模与平均运输距离和运输燃油费用相关联, 用于探讨容量规模的影响。

从表 1 稻草燃料的费用构成看出, 对燃料费用份额最大的是稻草收购价格, 约占 78%; 其次是码堆、装卸费用约占 11%; 单位质量运输油耗费用所占比例很小, 约为 1%。

在多数经济发达的地区, 稻草通常用作肥料或作为消除稻谷病害的措施燃烧还田, 部分用作牲畜饲料和炊事燃料, 少部分商品用途是造纸原料. 生物质电厂燃料需求量大, 大量稻草的商品用途可能导致地区稻草供求不平衡, 价格上涨的趋势毋庸置疑. 此外, 农村劳动力价格上升, 也可能导致稻草收集成本增加. 因此, 生物质电厂应加强对燃料供给链的规划和管理, 以减少燃料供给价格的大幅波动和燃料供给量的不确定性。

为进一步讨论电厂容量规模对燃料费用的影响, 我们将燃料费用分成固定费用和可变费用两个部分, 前者不随容量规模变化, 后者则随容量规模的扩大而有所增加. 我们假设稻草燃料费用构成中的稻草收购价格和储存费用为固定费用, 车辆购买和使用费, 以及运输油耗费用为可变费用。

图 1(a) 说明燃料收集半径和平均运输距离与电厂容量的关系, 对于小于 50MW e 规模的生物质电厂, 最大收集半径在 35 km 以内, 平均运输距离在 20 km 左右。

图 1(b) 表示运输油耗费用和车辆固定费用与电厂规模的关系, 电厂规模对车辆固定费用的影响甚小, 车辆固定费用的非光滑波动是由于计算中考虑备用车辆造成的. 运输油耗费用是平均运输距离的函数, 电厂规模越大, 平均运距越远, 稻草燃料的运输油耗费用越高. 可以看出, 运输油耗费用随电厂规模的扩大而增加, 但增加的总额并不大 (2~8 元/t), 相对于其它燃料费用组成部分, 运输油耗费用在整个费用构成中的比例依然很小。

表 1 4MW e 生物质发电系统稻草燃料费用估算表

Tab 1 Biomass cost estimation of 4MW e BIG/CC power plant

	数值	
1. 稻草属性	鲜稻草 / 谷物	1:1
	鲜稻草含水率 (干基)	200%
	收购稻草含水率 (干基)	13%
	稻草热值 (IHV) / ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	13.4
2 可供性	稻草平均产量 (\bar{Y}) / ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	6.50
	稻谷种植面积: 地理面积 (1/n)	1:6.5
	可利用比例 (λ)	40%
3 稻草燃料费用	稻草收购价格 / ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$)	140.0
	车辆费用 / ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$)	11.7
	运输油耗费用 / ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$)	2.6
	捆扎、码堆、装卸 / ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$)	25.0
	储存点保管费 / ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$)	2.0
合计 / ($\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$)	181.3	

生物质燃料是一种地区性资源, 电厂规模越大, 需求的燃料量越多, 越容易引起局部地区燃料价格波动(通常是价格上涨). Wiltsee^[8]调查了 20 座生物质发电系统的运行情况(其中 18 座生物质电厂位于美国, 另外两座分别位于加拿大和芬兰), 也证实了这点: 由于容量的扩大, 导致的生物质电厂附近地区燃料供给不足; 即便是生物质垃圾废料的价格也在 5 年内增加了两倍. 考虑到我国稻草、秸秆通常由农户分散供给, 不容易用合同约束的事实, 燃料的可供给性和价格问题在很大程度上限制了生物质电厂容量的扩大.

2 结 论

从前述的分析, 可以得到以下结论:

1) 稻草燃料价格是燃料费用构成中最重要的部分; 电厂容量规模增大, 燃料单位质量运输费用增加, 但增加的运输费用在总燃料费用的所占比例甚小.

2) 生物质燃料价格是影响生物质气化发电系统电力费用的最重要的因素之一. 确定合理的燃料收购策略, 避免燃料价格的大幅变动, 是降低电力费用和保障电厂正常运行的关键.

参考文献:

[1] Joris Koomneef, Martin Junginger, André Faai. Development of fluidized bed combustion— An overview of trends, performance and cost[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2007, 33(1): 19– 55.

[2] Askaïnen A, Kuitto J. Cost factors in wood fuel procurement[J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 2000, 30(1): 79– 87.

[3] Veonka Domburg, André P C Faaij. Efficiency and economy of wood– fired biomass energy systems in relation to scale regarding heat and power generation using combustion and gasification technologies[J]. Biomass and Bioenergy, 2001, 21: 91– 108.

[4] Wu C Z, Huang H, Zheng S P, Yin X L. An Economic Analysis of Biomass Gasification and Power Generation in China[J]. Bioresource Technology, 2002, 83: 65– 70.

[5] 贾友见, 余志, 吴创之. 生物质气化发电系统寿命周期评价[J]. 太阳能学报, 2004, 25(1): 56– 62.

[6] Ji Youjian, Yu Zhi, Wu C Z. Life Cycle Assessment of a 4MW e Biomass Integrated Gasification Gas Engines– Steam Turbine Combined Cycles Power plant[J]. Taiyangneng Xuebao, 2004, 25(1): 56– 62.

[7] Auke Koopmans, Jaap Koppejan. Agricultural and forest residues – generation, utilization and availability[R]. Bangkok: FAO, 1998: 1– 23.

[8] 国家统计局. 2003 中国县(市)社会经济统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2003: 1– 890.

[9] National Bureau of Statistics of China. 2003 statistical yearbook of China's counties social– economic status[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2003: 1– 890.

[10] Wiltsee G. Lessons Learned from Existing Biomass Power Plants[R]. Golden, Colorado, USA: NREL, 2000: 1– 149.

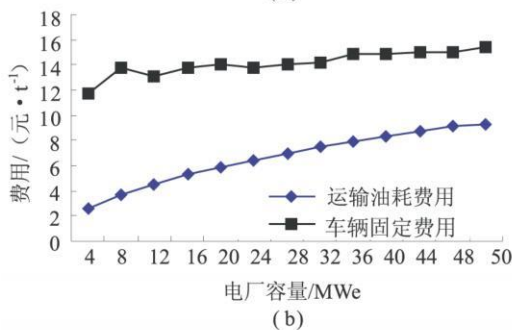
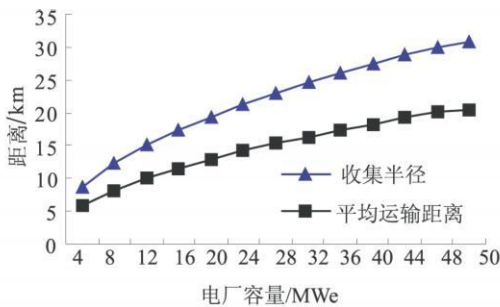


图1 电厂容量规模的影响(a) 收集半径和平均运输距离, (b) 车辆固定费用和油耗费用
 Fig.2 Capacity scale effects on (a) biomass fuel collection radius and averaged hauling distance, (b) averaged fixed costs and transportation fuel cost