

地区氢气资源协同优化供应方法研究

张胜中^{1*}, 秦丽姣¹, 黄志壮², 范得权¹, 张 英¹

(1. 中国石化大连石油化工研究院, 辽宁 大连 116045;

2. 中国石油化工股份有限公司化工事业部, 北京 100728)

摘要:根据地区多企业多套制氢装置的历史生产数据,拟合得到装置成本计算公式,进一步采用递归算法建立了多装置最低制氢成本的计算方法。应用 Java 语言开发了氢气资源生产方案优化软件 V1.0,可以根据市场物料价格,求得多套制氢装置的最低成本生产方案。在考虑碳排放与碳税的情况下,进一步分析了煤制氢与天然气制氢装置的经济性,可以为多企业间制氢生产方案的制定提供更为全面的理论计算依据。

关键词:氢气资源;协同优化;碳税

中图分类号:TK91

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)10-0226-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.10.051

Research on collaborative optimization on supply method of regional hydrogen resources

ZHANG Sheng-zhong^{1*}, QIN Li-jiao¹, HUANG Zhi-zhuang², FAN De-quan¹, ZHANG Ying¹

(1. Dalian Research Institute of Petroleum and Petrochemicals, Sinopec Corp., Dalian 116045, China;

2. Chemical Department, China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China)

Abstract: According to the historical production data of three hydrogen production units in different companies in a region, the calculation formula for unit cost is got via fitting. Furthermore, the calculation method for the lowest hydrogen cost suitable for multi units is established by using the recursive algorithm. The optimization software (V1.0) for hydrogen resource production scheme is developed by application of Java language, which can obtain a scheme gaining the lowest cost production for multi hydrogen production units according to market prices of materials. In the view of considering carbon emission and tax, the economies of hydrogen production from coal and natural gas are further analyzed, which can provide a more comprehensive theoretical basis for proceeding scheme of hydrogen production plan for multiple enterprises in a region.

Key words: hydrogen resource; collaborative optimization; carbon emission tax

根据 Hart Energy 预测,2010—2030 年间,全球为获得清洁燃油而采用的油品加氢过程,将消耗超过 4 000 亿 m³ 的氢气,对氢气需求增长的 40% 以上来自亚太地区^[1],其中主要增长量来自中国。在我国,根据加工流程与深度的不同,千万吨级的炼化企业对制氢量的需求在 10 万~30 万 m³/h,主要采用的制氢方式为煤制氢与天然气制氢。作为独立的公用工程装置,在多数千万吨级的炼化企业,一般同时建有煤制氢与天然气制氢装置,而在经济发达的地区,又建有多个炼化企业。如果使同一地区内、不同企业间的制氢装置协同生产,实现氢气资源的优化供应,则能达到资源利用效率与经济性最优化的目的,同时也符合区域产业协同发展的趋势。

本文中根据某地区 3 家企业 2 套煤制氢与 1 套天然气制氢装置的生产数据,构建了制氢装置的成

本计算数学模型,采用递归算法求取多套制氢装置的最低运行成本,应用 Java 语言开发了氢气资源生产方案优化软件 V1.0。该软件可以为地区多企业间或者企业内多套制氢装置的最低成本运行提供理论计算工具。

另一方面,作为炼化企业主要的碳排放源,我国天然气制氢的碳排放系数为 5.697 t/t^[2],根据煤炭原料与生产技术不同,煤制氢的碳排放量在 14.461~20.022 t/t^[3],随着我国能源供给侧改革的不断深入,对煤炭消费制定越来越严格的控制性措施成为趋势^[4],本文中在考虑碳税的情况下,对 2 类制氢装置的经济性做了进一步分析。

1 制氢装置成本构成因素分析

2 套煤制氢与 1 套天然气制氢装置的日均产能与生产负荷边界条件如表 1 所示。

收稿日期:2018-03-12;修回日期:2018-07-22

作者简介:张胜中(1986-),男,硕士,工程师,研究方向为过程强化与气体净化技术开发,通讯联系人,0411-39699537, zhshzh1209@alipay.com。

表1 制氢装置概况

序号	产能/(t·d ⁻¹)	生产负荷边界条件	类型
A	245	0.5~1.1	煤制氢
B	245	0.5~1.1	煤制氢
C	75	0.5~1.1	天然气制氢

1.1 煤制氢装置成本分析

对煤制氢装置 A 生产物耗组成分析,可知其成本由原料、辅料、燃料动力、生产费用、人工及副产品构成,生产负荷为 0.87 时,装置某月成本构成因素分析如表 2 所示。从表 2 可知,煤制氢成本构成因素中,原料煤、动力与制造费用为主要成本因素,助剂、燃料与人工成本对装置成本计算的影响较小。采集 2015—2017 年制氢装置 A 有效月度的生产数据 27 组,对每月的成本构成进行分析,得到装置成本构成与生产负荷的数据,如表 3 所示。

表2 制氢装置 A 成本因素统计分析表

成本因素	消耗/ (t·t ⁻¹)	物料单价/ (元·t ⁻¹)	单项成 本/元	成本占 比/%
原料:煤	8.84	320	2828.8	41.04
辅料:助剂	0.03	2400	72	1.04
动力:水			273.78	3.97
新鲜水	7.95	0.74		
脱盐水	22.17	2.58		
循环水	1491.69	0.14		
动力:电	4821 kWh/t	0.6 kWh/t	2892.6	41.96
燃料:炼厂气	0.028	2670	74.76	1.08
生产费用(含折旧)			1693	24.56
人工			142	2.06
副产品:蒸汽	-7.06	115	-811.9	-11.78
副产品:氮气	-0.85	320	-272	-3.95
合计			6893.04	100

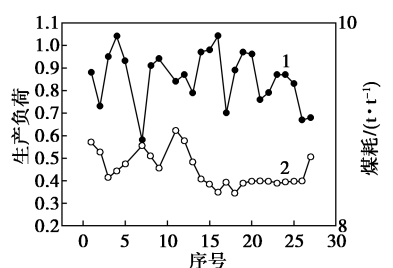
表3 制氢装置 A 主要成本因素与生产负荷数据表

序号	生产 负荷	煤/ (t·t ⁻¹)	电耗/ (kWh·t ⁻¹)	循环水/ (t·t ⁻¹)	新鲜水/ (t·t ⁻¹)	脱盐水/ (t·t ⁻¹)	外供蒸汽/ (t·t ⁻¹)	人工/ (元·t ⁻¹)	生产费用/ (元·t ⁻¹)	副产品/ (元·t ⁻¹)
1	0.29	8.70	8051.75	3993.48	21.95	21.64	-4.58	106.99	5355.68	-432.29
2	0.46	8.97	5679.39	2997.51	9.30	22.43	-8.13	339.49	3471.64	-360.25
3	0.58	8.79	5970.33	2879.03	7.31	24.40	-7.49	—	2517.01	-303.78
4	0.67	8.44	5681.07	1995.31	8.16	20.14	-5.26	171.95	2250.99	-426.92
5	0.70	8.43	5600.37	2340.89	7.26	21.21	-5.68	182.55	2141.18	-327.94
6	0.76	8.44	5327.15	1981.81	7.47	22.20	-6.23	190.86	1868.68	-263.47
7	0.84	8.94	4926.32	1540.29	7.88	21.99	-7.40	317.25	2423.72	-255.31
8	0.87	8.84	4821.77	1491.69	7.95	22.17	-7.06	142.47	1693.39	-271.61
9	0.89	8.32	4737.76	1927.57	6.02	18.60	-5.29	145.78	1776.38	-254.09
10	0.91	8.69	4751.50	1920.22	5.71	21.98	-7.05	135.25	1666.57	-253.49
11	0.98	8.41	4428.93	1589.13	5.24	18.80	-6.61	132.36	1884.69	-224.35
12	1.04	8.33	4247.39	1607.84	4.73	17.96	-6.52	139.28	1485.05	-229.79

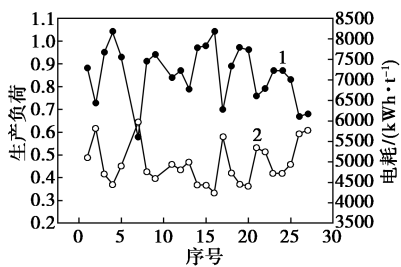
在图 1 图示分析过程中采用了所有 27 组有效数据,在表 3 中对生产负荷相同或接近的数据没有重复列出。对制氢装置 A 的主要成本因素进行分析发现,原料煤、副产蒸汽、人工、副产氮气等成本因素与装置 A 的生产负荷没有数学相关性,而是更趋近于常数;新鲜水、脱盐水、电耗、生产费用与装置 A 的生产负荷有较好线性相关性。关于成本因素与装置生产负荷的数学相关性图示分析示例见图 1,图 1 中,(a)、(d)分别为生产负荷与煤耗、副产蒸汽的分析图示,由图可知,当生产负荷在 0.25~1.05 变化,生产每吨氢气的煤耗在 8.3~9.0 t 变化,而煤耗的变化与生产负荷的升降并没有规律性的联系,副产

蒸汽的量随生产负荷的变化同样没有规律性的关系;(b)、(c)分别为生产负荷与电耗、生产费用的分析图示,由图可知,当生产负荷在 0.25~1.05 变化,生产每吨氢气的电耗随着生产负荷降低而升高,具有很好的线性相关性;生产费用也随生产负荷的降低而升高,同样具有很好的线性相关性。

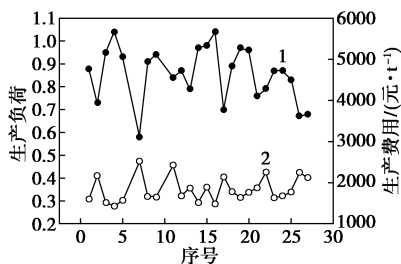
采用 $y = a + bx + \dots$ 的数学关系式对生产负荷与电耗、生产费用、新鲜水、循环水进行计算公式拟合,其中 x 为装置 A 的生产负荷, y 为生产每吨氢气(吨氢)的物耗值。图 2 所示分别为生产负荷与吨氢电耗、生产负荷与吨氢生产费用之间拟合线示例。对于其他成本因素,通过求取平均值的方式得到生产



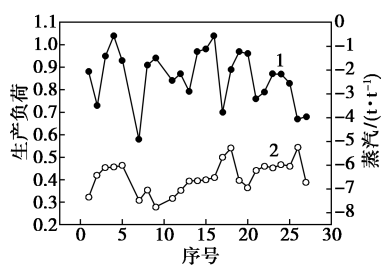
1—生产负荷;2—煤耗
(a)



1—生产负荷;2—电耗
(b)

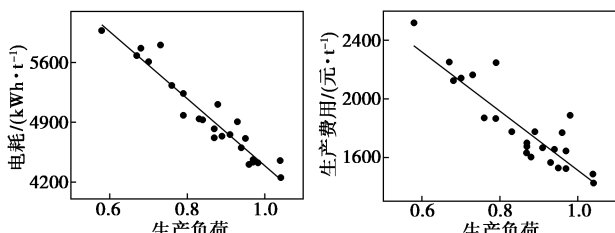


1—生产负荷;2—生产费用
(c)



1—生产负荷;2—蒸汽
(d)

图 1 生产负荷与制氢成本因素相关性分析



(a) (b)

图 2 生产负荷与吨氢生产物耗拟合线

吨氢的物耗值。装置 A 生产吨氢的各成本因素消耗值计算公式如表 4 所示,表 4 中,生产吨氢物耗量

计算公式适用于装置生产负荷在 0.5~1.1 时,与装置设计的生产负荷边界条件相对应。

表 4 制氢装置 A 各成本因素数据拟合计算公式

成本因素	吨氢物耗量 计算公式	计算示例 (与表 2 比较)
原料:煤	8.54	2732.80 t/t
辅料:助剂	0.03	72.00 t/t
动力:水		
新鲜水	$y=23.69-18.71x$	5.49 t/t
循环水	$y=3531.37-2020.80x$	248.26 t/t
脱盐水	20.31	52.40 元/t
动力:电		
生产负荷>0.5	$y=8437.37-4056.50x$	2944.93 kWh/t
燃料:炼厂气	0.032	85.44 t/t
生产费用(含折旧)		
生产负荷>0.5	$y=3858.75-2333.71x$	1828.42 元/t
人工	146.94	146.94 元/t
副产品:蒸汽	-6.50	-747.50 t/t
副产品:氮气	-282.92	-282.92 元/t
合计		7086.25(相对误差 2.8%)

采集制氢装置 B 2015—2017 年生产物耗数据,采用与装置 A 相同的数据处理方法,得到各成本因素计算公式如表 5 所示,其中 x 为装置 B 的生产负荷, y 为生产每吨氢气(吨氢)的物耗值。

表 5 制氢装置 B 各成本因素数据拟合计算公式

成本因素	吨氢物耗量计算公式
原料:煤	7.51
辅料:助剂	226.91
动力:水	
蒸汽	$y=28.35-13.20x$
新鲜水	48.10
循环水	$y=4889.09-1923.659x$
动力:电	
生产负荷>0.5	$y=2910.74-1041.91x$
燃料:炼厂气	0.20
生产费用(含折旧)	
生产负荷>0.5	$y=3830.95-2297.54x$
人工	324.61
副产品	-1.73
副产品:脱盐水	-8.49

1.2 天然气制氢装置成本因素分析

对制氢装置 C 每月生产平均物耗组成进行分析,可知原料天然气与燃料炼厂气为制氢装置 C 的关键成本因素,其他物耗占比对天然气制氢装置的

成本计算影响较小。表 6 为某月制氢装置 C 成本构成统计分析示例。

表 6 制氢装置 C 成本因素统计分析表

成本因素	消耗/ (t·t ⁻¹)	物料单价/ (元·t ⁻¹)	单项成 本/元	成本占 比/%
原料				82.47
天然气	3.06	2731	8353.8	
氢气	0.03	5999	179.7	
辅料:助剂	0.03	2400	72	0.70
动力				0.82
新鲜水	1.93	2.00	3.86	
脱盐水	4.44	0.44	17.49	
循环水	84.47	3.94	37.16	
氮气	0.09	298.14	26.83	
动力:电	233.25 kWh/t	0.61 kWh/t	142.28	1.37
燃料:炼厂气	0.81	2524	2044.44	19.76
生产费用(含折旧)			250.23	2.42
人工			5	0.05
副产品:中压蒸汽	-7.62	103	-784.86	-7.58
合计			10347.94	100.00

注:装置生产负荷 0.86。

采集制氢装置 C 2015—2017 年生产物耗数据,采用与装置 A/B 相同的数据处理方法,得到各成本因素计算公式如表 7 所示,其中 x 为装置 C 的生产负荷, y 为生产每吨氢气(吨氢)的物耗值。

表 7 制氢装置 C 各成本因素数据拟合计算公式

成本因素	吨氢物耗量计算公式	计算示例(与表 6 比较)
原料		
天然气	3.09	8435.70 t/t
氢气	0.029	173.71 t/t
辅料:助剂	48.89	48.89 元/t
动力		
新鲜水	$y=5.94-4.72x$	3.76 t/t
脱盐水	$y=14.55-11.41x$	18.67 t/t
循环水	$y=269.54-216.33x$	36.74 t/t
氮气	0.099	29.52 t/t
动力:电	$y=396.87-192.47x$	141.12 kWh/t
燃料:炼厂气	$y=2.12-1.73x$	1595.67 t/t
生产费用(含折旧)	$y=475.61-272.75x$	241.05 元/t
人工	5.90	5.90 元/t
副产品:中压蒸汽	$y=-23.28+19.63x$	-659.01 t/t
合计		10071.71(相对误差-2.67%)

分别参考表 2 与表 6 中月份的物料价格,对制氢装置 A 与 C 的成本计算公式进行验证,计算示例

见表 4 和表 7,根据生产负荷大于 0.5 的月份生产物耗数据与当月物料价格,分别采用表 4、表 5、表 7 中的制氢装置成本计算公式求取对应月份的吨氢生产成本,将计算成本与实际统计成本求取相对误差,误差范围在±5%以内;对于生产负荷大于 0.75 的月份,相对误差在±3%以内,证明通过上述方法得到的制氢装置成本计算公式可以用来预测一定生产负荷下,装置月度制氢成本。

2 地区制氢装置协同优化生产方法建立

2.1 生产方案优化方法

当地区月度计划生产氢气量 F 确定后,如图 3 所示,以地区制氢成本最低为优化目标,求取各制氢装置的计划排产量。根据装置的产能与生产负荷范围,为 A、B、C 3 套制氢装置分配产量 $F_a、F_b、F_c$,初始值为装置 A 的最小生产负荷,即 $F_a \cdot 0.5$ (F_a 为装置 A 的满负荷生产时产能),同时满足判定条件 $F_a + F_b + F_c = F$ 的情况下,进一步求取装置生产负荷 $X_1 = F_a/F_A、X_2 = F_b/F_B、X_3 = F_c/F_C$ ($F_A、F_B、F_C$ 分别为装置满负荷产能),根据生产负荷、当月物料单价及对应装置的成本计算公式 f_i (见表 4、表 5、表 7),可以得到制氢装置在分配产量下的成本 $C_i = f_i(X_i)$ ($I = a, b, c; i = 1, 2, 3$),进一步求取月度地区产氢量总成本 $Y_i = C_a F_1 + C_b F_2 + C_c F_3$ 。设定步长(如产量在初始值的基础上增加 10 t),改变初始值 $F_{a+1} = F_{a+10}$,求取下一个产量分配下的总成本 Y_{i+1} ,比较并记录 Y_i 与 Y_{i+1} 中的较小值,循环以上步骤直至得到最低生产总成本,对应各制氢装置的生产负荷即为月度最优计划生产安排。

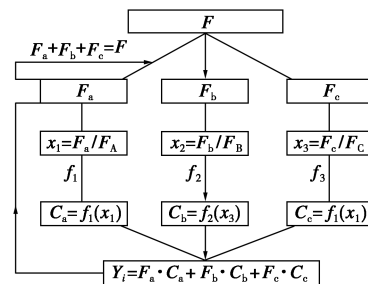


图 3 地区月度最优生产方案计算步骤

2.2 软件开发与应用

综合 3 套制氢装置产能信息与制氢成本计算公式,应用递归算法实现了地区月度最优生产方案的求解,采用 Java 语言开发了氢气资源生产方案优化软件 V1.0。在实际生产过程中,该软件主要有 2 方面的功能,一是根据原料价格预测装置生产成本,为

物料采购提供参考;二是为地区多套产氢装置的月度计划生产提供排产与互供方案。

对于有多套煤制氢与天然气制氢的地区,根据市场制氢原料价格预测各装置的制氢成本,可以为各企业原料的协调采购提供参考。以本文中 3 套装置在 2016—2017 年间生产数据为例,在原料煤价格从 320 元/t 升至 700 元/t 的过程中,由于期间天然气价格基本稳定在约 3 000 元/t,设定装置开工负荷均为 0.85,通过软件计算分析发现,煤制氢装置 A、B 的吨氢生产成本随着煤价的升高,逐渐接近并超过天然气制氢装置 C 的吨氢成本,结果如表 8 所示。通过分析可以发现,当煤价高于 650 元/t 的情况下,煤制氢装置在经济性上不再占有优势。

表 8 原料煤价格对制氢成本影响分析 元/t

煤价	A 装置制氢成本	B 装置制氢成本	C 装置制氢成本
320	7187	7301	10100
400	7870	7902	10100
500	8724	8653	10100
600	9578	9403	10100
700	10432	10154	10100

当采购制氢原料完成之后,在氢气资源生产方案优化软件 V1.0 中输入各项物耗的价格与地区月度计划总需氢量,可以计算得到月度制氢装置的排产方案,同时在需求量临时调整时,也可以通过修改总需求量,及时获得最经济的排产方案,使地区制氢成本最优化。图 4 为根据某月原料价格与月度计划生产氢量计算得到的装置排产方案(对应开工负荷),在该月中原料煤的价格超过了 600 元/t,可以看出,天然气制氢装置 C 在经济性上已经优于煤制氢装置 B,厂区互供结果显示,A、C 装置需要分别给 B 装置所在企业输送一定量的氢气。

厂区	装置类别	装置名称	计划生产量 (t)	开工负荷	制氢成本 (元)	制造成本 (万元)	编辑
1	A	煤制氢	8300	1.09	9114	7564.83	详细
2	C	天然气制氢	2500	1.07	9469	2367.33	详细
3	B	煤制氢	5700	0.75	10076	5743.34	详细

图 4 氢气资源生产方案优化软件计算示例

2.3 考虑碳税的制氢经济性分析

随着 2016 年“十三五规划”能源相关政策的出台,考虑二氧化碳排放对环境的影响^[5],煤炭采选行业固定资产投资快速下滑,煤炭价格 2015—2017 年增

长超过 100%。原料煤在煤制氢装置成本构成中占比从 40%到超过 50%,煤制氢成本在高煤价下的成本优势不断减少;另一方面,世界上多个国家已经开始征收二氧化碳税,瑞典碳税高达 150 美元/t^[6]。参考我国碳交易试点北京环境交易所数据^[7],如果我国开始征收碳税在 20~100 元/t,参考 2017 年原料煤价格 600~650 元/t,对煤制氢与天然气制氢成本的比较如表 9 所示,表 9 中,装置开工负荷均选择 0.85,天然气价格为 3 000 元/t,煤价格为 650 元/t,碳税选择 50 元/t,由计算结果可知,高煤价与碳税双重因素影响下,煤制氢将不再具有成本优势。

表 9 考虑碳税时制氢装置成本对比示例

制氢装置	吨氢成本/(元·t ⁻¹)	碳排放系数/(t·t ⁻¹)	考虑碳排放吨氢成本/(元·t ⁻¹)
A	10005.74	14.461	10728.79
B	9779.33	14.461	10502.38
C	10100.55	5.697	10385.40

3 结论

随着我国传统能源行业供给侧的不断改革与产业结构不断升级,打破厂区边界利用公用工程,从而使地区总体经济效益与环境效益最大化是必然发展趋势。本文中以 3 个厂区的 3 套制氢装置生产方案优化为例,为地区制氢装置协同优化供应提供了优化排产方法,同时可以实时明确地区制氢装置的生产状态与互供情况,增加地区供氢的安全性。另外,开发的软件具有开放性与可扩展性,还可以录入多套制氢装置的成本计算公式,同时不断根据生产数据校准计算公式,为地区制氢经济与环保效益最大化提供理论计算工具与排产方案。

参考文献

- [1] Hart Energy Publishing. Refinery hydrogen review: Outlook for growth to 2030[R]. ID:1802128, 2011.
- [2] 崔翔宇,徐双庆,李兴春,等.我国石油炼化制氢装置碳排放因子的修正建议[J].石油与天然气化工,2015,44(2):48-50.
- [3] 李大东,聂红,孙丽丽.加氢处理工艺与工程[M].北京:中国石化出版社,2016:1426.
- [4] 岳立,严珺文.新常态下中国能源供给侧改革:国际借鉴与路径探究[J].当代经济管理,2017,39(2):94-97.
- [5] 刘宁.能源行业固定资产投资对二氧化碳排放的影响研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.
- [6] 王晶.关于我国开征二氧化碳税的思考[J].税务与经济,2009,(5):95-100.
- [7] 魏庆坡.碳交易与碳税兼容性分析[J].中国人口·资源与环境,2015,25(5):35-43. ■