

文章编号: 1001-8719(2004)01-0058-05

## 炼油厂氢气网络集成管理

## HYDROGEN NETWORK INTEGRATIVE MANAGEMENT IN REFINERY

张 毅<sup>1</sup>, 阳永荣<sup>1</sup>, 刘 军<sup>1</sup>, 郭宏新<sup>2</sup>, 唐应刚<sup>1</sup>ZHANG Yi<sup>1</sup>, YANG Yong-rong<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>, GUO Hong-xin<sup>2</sup>, TANG Ying-gang<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 化工系, 浙江 杭州 310027; 2. 洛阳石化化工工程公司, 河南 洛阳 471003)

(1. Department of Chemical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Luoyang Petrochemical Engineering Corporation, Luoyang 471003, China)

**摘要:** 研究了炼油厂氢气网络的供应方案, 使用超结构技术优化设计氢气网络。在综合分析了炼油厂氢源、氢阱的氢气流股的流量、纯度、压力和有害杂质等因素后, 确定目标与约束条件, 运用序贯二次规划算法 (Sequence Quadratic Programming, 简称 SQP) 求得最优氢气供应方式。最后以某千万吨级的炼油-化肥联合企业的氢气网络优化为例, 说明了方法的有效性。

**关键词:** 氢气网络; 超结构; 炼油厂

**中图分类号:** TQ021.8 **文献标识码:** A

**Abstract:** The best supply scheme of hydrogen in refinery was studied by superstructure method, which formed the basis of a systematic approach to solving the complex problem of hydrogen system management. Superstructure was established on the basis of comprehensive analysis of hydrogen sinks and hydrogen sources, with respect to hydrogen flowrate, purity, pressure and detrimental impurities. After defining the optimization objective function the process constraints and economic data being decided, the superstructure was mathematically optimized by using the Sequence Quadratic Programming (SQP) to determine the most effective hydrogen network. The validity of the method was illustrated with an industrial case collected from a large scale refinery-fertilizer complex.

**Key words:** hydrogen network; superstructure; refinery

根据统计, 近 10 年来炼油企业对氢气的需求增长了一倍以上。随着含硫原油和重质原油加工比例的增大, 以及原油加工深度和环境保护对油品质量要求的不断提高, 加氢工艺得到越来越广泛的应用, 但 50%~70% 的炼油厂缺乏氢气。炼油厂使用的氢气以催化重整副产品氢气为主, 但随着对汽油中芳烃含量的限制, 重整装置的加工量减少, 副产品氢气的数量也就减少了。2000 年以来, 由重整装置提供的氢气已远远满足不了加氢工艺的需求, 因此炼油厂增加了制氢装置的数量。但新建制氢装置所需投资大、运行费用高。又由于采用蒸汽转化法制氢是以石脑油、炼厂尾气或甲烷为原料, 所以在生产氢气的同时, 排放大量的二氧化碳温室气体。

优化氢气网络以减少制氢装置数量或负荷是寻求环境效益和经济效益的重要方法, 但直至目前, 系统分析和优化炼油厂全厂氢气网络的研究工作还处于起步阶段。1998 年国外学者<sup>[1-3]</sup>首先提出了炼油厂氢气夹点和氢气网络优化的概念和方法。氢气夹点类似于换热网络中的夹点概念, 通过找出氢气网络的夹点, 最终实现氢气的梯级利用。

笔者采用质量集成中的超结构方法, 将氢气网络中的装置分为氢源和氢阱, 在氢源和氢阱之间建立

超结构连接，以总的供氢费用最小为目标，综合考虑氢气流量、纯度、压力和有害杂质等因素，求得最优的氢气供应方式。以某千万吨级的炼油-化肥联合企业的氢气网络为例，取得了明显的潜在经济效益，为企业优化生产提供了理论依据。

1 氢气网络流程介绍

以原油加工能力为 1000 万 t/a 的某炼油-化肥联合企业为例，该炼厂以中东高硫原油为原料，生产燃料油。多数燃料油产品都必须经过加氢反应才能符合质量标准，所以氢气用量很大，迫切需要优化氢气网络。该厂现有的氢气网络中各个装置之间的关系如图 1 所示。和氢气相关的装置可以分为氢源和氢阱。氢源指供氢装置，氢阱指耗氢装置。在本系统中，氢阱包括 5 套加氢精制( HT )和 1 套加氢裂化( HC )，氢源包括半再生重整( SCR )和连续重整装置( CCR )各一套，两套制氢( Hplant )和一套变压吸附提纯装置( PSA )，另外还有化肥厂生产的氢气( 简称化肥氢、FER )可以供应到炼厂的氢气管网。各装置的产氢或耗氢数据及其相应的氢气纯度、压力、价格等数据列于表 1。

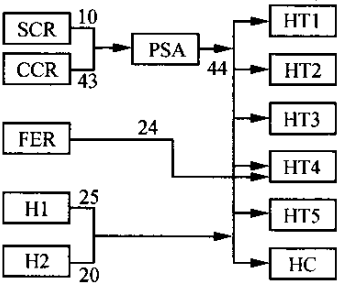


图 1 现有氢气网络结构

Fig.1 The existing of structure of hydrogen network

表 1 装置产氢与耗氢数据<sup>1)</sup>

Table 1 Data of hydrogen sinks and hydrogen sources

Hydrogen sources	Maximum flow rate $\times 10^{-3}/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Purity /%	Pressure $/\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$	Price/RMB Yuan $\cdot \text{m}^{-3}$	Hydrogen sinks	Flow $\times 10^{-3}/\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Purity /%	Pressure /MPa
SCR	10	0.9	12	0.15	HT1	5.96	0.9	7
CCR	43	0.92	12	0.15	HT2	3.8	0.87	5
Hplant1	25	0.95	12	0.55	HT3	12.5	0.92	7
Hplant2	25	0.95	12	0.55	HT4	24	0.96	7
FER	70.6	0.97	70	0.45	HT5	23	0.98	10
PSA	50	0.99	12	0.25	HC	44	0.94	20

1 ) The value is the maximum flowrate hydrogen source can supply.

经过分析发现，此炼油厂在装置的改扩建过程中，没有优化氢气系统，其氢气网络中存在以下问题：

- ( 1 ) 流程中重整装置的副产品氢气的纯度分别达到 92 % 和 90 %，无需提纯即可供给 HT1、HT2、HT3 使用。但是，目前仍全部经过 PSA 装置提纯。
- ( 2 ) 不同氢源的氢气混合，降低了总氢气的纯度。如图 1 中的 PSA 提纯后的氢气纯度为 99 %，两个制氢装置生产的氢气纯度为 95 %，完全混合再供给耗氢装置，氢气纯度有可能低于 98 %，难以满足 HT5 装置对氢气纯度( 98 % )的要求。
- ( 3 ) 由于市场的原因，化肥厂生产的氢气( 简称化肥氢 )有富余，它的价格较制氢装置生产的氢气便宜，而且压力高( 7 MPa )，可以不用压缩机而直接供应给一些装置，节省能耗。但是现在化肥氢只供给了 HT4。

2 氢气网络超结构分析

建立超结构，首先要综合考虑氢气系统中的供氢装置、耗氢装置、提纯装置、管网等各种因素，确定氢源和氢阱，在系统中建立从氢源到氢阱所有可能的连接。然后建立数学模型来表述设计方案，选择合适的优化算法进行计算。笔者利用超结构优化的方法解决了最优网络的合成问题。

2.1 超结构图

将上述炼油厂的氢气网络建立成如图 2 所示超结构。2.2 优化目标

对于氢气系统，假定主要从供氢量和供氢压力两个方面影响氢源的加工费用。由于生产工艺不同，各供氢装置氢气的生产成本不同，如何调整不同供氢装置的供氢量是优化的关键。另一方面，耗氢装置的操作压力与供氢装置的氢气压力不同，需要通过压缩机连接。不同的压力匹配将导致压缩机的能耗不同，构成了另一个需优化的因素。在本模型中，假设固定各种供氢装置的氢气价格，以炼油厂供氢费用和压缩机电费之和达最小为目标，表达式如下：

$$C = \sum_j (\sum_k F_{j,k} \times C_j) + C_e \times \sum_j \sum_k (3.6 \times P_{j,k}) \tag{1}$$

其中  $P_{j,k}$  的计算公式如下所示：

$$P_{j,k} = \frac{c_P \times T}{\eta} \left[ \left( \frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] \times \frac{\rho_o}{\rho} \times \frac{F_{j,k}}{80.64} \tag{2}$$

通过简单的变化，也可将本模型用于建立更广泛的目标函数，如最小操作费用或最小总加工费用等。

2.3 约束条件

2.3.1 氢阱约束

耗氢装置一般称为氢阱。为了维持耗氢装置的运行，反应器入口处的氢气必须满足一定的氢气总量和氢气纯度。

流量约束：

$$\sum_j F_{j,k} \geq F_k \tag{3}$$

氢气纯度约束：

$$\frac{\sum_j F_{j,k} y_j}{\sum_j F_{j,k}} \geq y_k \tag{4}$$

2.3.2 氢源约束

供氢装置一般称为氢源。氢源的氢气可以用于氢阱，也可以用作燃料。氢源氢气的纯度一般是固定的，因此，其约束为供给所有氢阱的氢气总量必须小于等于氢源的最大供应量。

流量约束：

$$\sum_k F_{j,k} \leq F_j \tag{5}$$

2.3.3 变压吸附 (PSA) 约束

变压吸附装置 (PSA) 为一种提纯装置，它的功能是将低纯度的氢气变为高纯度的氢气。在氢气网络中，PSA 的操作要考虑产品纯度、产品压力和氢气回收率 3 个因素。其中氢气回收率  $R$  指产品中氢气量占进料中氢气量的百分比。对于特定的 PSA，认为它的产品纯度和回收率是固定的。

PSA 入口流量：

$$F_{PSA,i} = \sum_j F_{j,PSA} \tag{6}$$

PSA 入口氢气纯度：

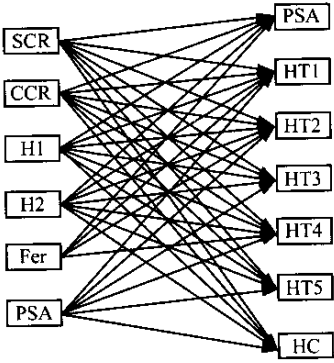


图 2 氢气网络超结构图  
Fig.2 Superstructure of hydrogen network

$$y_{\text{PSA } i} = \frac{\sum_j F_{j, \text{PSA}} y_j}{\sum_j F_{j, \text{PSA}}} \quad (7)$$

当 PSA 出口的产品氢气纯度  $y_{\text{PSA } o}$  和 PSA 的氢气回收率  $R$  已经确定, 那么产品的流量为:

$$F_{\text{PSA } o} = \frac{R \times F_{\text{PSA } i} \times y_{\text{PSA } i}}{y_{\text{PSA } o}} \quad (8)$$

由于使用 PSA 提纯氢气的费用远低于通过制氢装置生产氢气的费用, 所以可以考虑在氢气网络中尽可能多的使用 PSA 提纯氢气。如果氢气网络中已经存在 PSA 装置, 则可以通过优化, 重新确定它的进料量和进料组成。

#### 2.3.4 氢气中杂质约束

加氢催化剂对杂质的要求很高, 所以必须分析氢源中含有的杂质以及杂质对催化剂的影响, 在优化时应限制相应装置的匹配。如化肥厂生产的用于合成氨的氢气中含有一氧化碳, 不能用于 HT5 和 HC 装置, 否则会引起催化剂中毒。

#### 2.4 优化求解方法

由于目标中的压缩机功率计算(式(2))和氢阱对氢气的纯度约束(式(4))存在非线性关系, 因此属于非线性(NLP)优化问题, 需要使用非线性算法求解。序贯二次规划(SQP)算法, 是求解约束问题最有效的方法之一, 它具有全局收敛性和超线性收敛速率。采用 SQP 优化计算结果表明, 该算法非常有效。

#### 2.5 优化结果

经过对图 1 流程的模拟可知, 其氢气供应费用是每小时 5.15 万元人民币。利用超结构方法优化后的氢气网络流程如图 3 所示。图中的数字为各个流股的流量, 其总供氢费用为每小时 4.32 万元人民币, 转化为 1 年的费用, 相当于每年可以节省 702.3 亿元人民币。经过分析知道, 其中每年 541.6 亿元人民币是通过调整流量和 PSA 的加工量节省的, 另外每年 160.7 亿元人民币是节省的压缩费用。

调整流程必然要求新增一部分输送氢气的管道, 经过计算, 新增管道的总费用是 3.16 亿元人民币, 相对于每年可以节省的费用而言, 所占比例很小。优化后的流程图主要从以下 4 个方面调整了原有氢气网络(如图 3 所示)。

(1) 在优化前的氢气网络中, PSA 提纯的氢气和制氢的氢气混合供给氢阱, 不利于氢气的梯度利用。优化后, 不同氢源的氢气是在每一个氢阱装置前按照需求以一定比例混合, 既满足了不同装置的需求, 又节省了费用。

(2) 原流程中两套重整装置的副产氢气全部经过 PSA 提纯。优化后只有连续重整的  $19000 \text{ m}^3/\text{h}$  的氢气经过 PSA 提纯, 另外  $24000 \text{ Nm}^3/\text{h}$  的氢气直接供应 HT5 和 HC 装置。

(3) 通过分析数据知道, 重整氢气可以直接供给 HT1~3 装置, 但是优化结果表明, 它们的氢源是费用较高的化肥氢。如果 HT1~3 装置使用重整氢, 而化肥氢中的杂质又使之不能用于 HT5 和 HC 装置, 那么必须使两套制氢全部开工满足才能 HT5 和 HC 装置的需氢量, 这样比只开 1 套制氢, 另外用 PSA 提纯重整氢作为氢源的费用更高。这一结果也说明了序贯二次规划算法在本问题中可以求得全局最优解。

(4) 通过更多的利用化肥氢减少了能耗。化肥氢的压力达到  $7.0 \text{ MPa}$ , 远高于制氢的压力 ( $1.2 \text{ MPa}$ ), 减少了加氢装置入口压缩机的能耗。

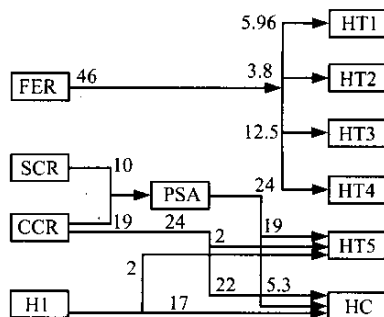


图 3 优化后的氢气网络图

Fig.3 The optimized design of hydrogen network

3 结 论

利用超结构方法设计了炼油厂氢气网络。首先区分了氢源和氢阱的概念，并建立了氢气网络中所有氢源和氢阱之间可能的连接。采用非线性优化算法计算，得到了最优化流程。以原油加工能力为 1000 万 t/a 的炼油-化肥联合企业为例，考虑了现有氢气系统的装置，以总氢气费用和氢气压缩机电费之和最少为目标，通过计算，优化了网络结构，结果表明，每年可以节省费用 702.3 亿元人民币。

符号说明：

$C$ ——总费用，Yuan/h；	$P_{j,k}$ ——氢源 $j$ 到氢阱 $k$ 的压缩能耗，W；
$C_e$ ——压缩机用电单价，RMB Yuan/kW·h；	$R$ ——PSA 的氢气回收率，%；
$C_j$ ——氢源 $j$ 的价格，RMB Yuan/m <sup>3</sup> ；	$T$ ——压缩机入口温度，K；
$c_P$ ——氢气等压热容，J/mol·K；	$y_j$ ——氢源 $j$ 的氢气纯度，%；
$F_j$ ——氢源 $j$ 的最大供氢量，m <sup>3</sup> /h；	$y_k$ ——氢阱 $k$ 的最小氢气纯度，%；
$F_k$ ——氢阱 $k$ 的最小需氢量，m <sup>3</sup> /h；	$y_{\text{PSA},i}$ ——PSA 入口氢气纯度，%；
$F_{j,k}$ ——氢源 $j$ 到氢阱 $k$ 的流量，m <sup>3</sup> /h；	$y_{\text{PSA},o}$ ——PSA 出口氢气纯度，%；
$F_{j,\text{PSA}}$ ——氢源 $j$ 到 PSA 的流量，m <sup>3</sup> /h；	$\gamma$ ——氢气等压热容与等温热容之比；
$F_{\text{PSA},i}$ ——PSA 入口氢气流量，m <sup>3</sup> /h；	$\eta$ ——压缩机效率，%；
$P_i$ ——压缩机入口压力，MPa；	$\rho$ ——标准状态下氢气密度，kg/m <sup>3</sup> ；
$P_o$ ——压缩机出口压力，MPa；	$\rho_o$ ——压缩机出口处氢气密度，kg/m <sup>3</sup> ；

参考文献：

[1] Towler G P, Mann R, et al. Refinery hydrogen management: cost analysis of chemically-integrated facilities[J]. Ind Eng Chem Res, 1996, 35(7): 2378-2388.

[2] Alves J J, Towler G P. Design of refinery hydrogen network[M]. Workshop presented at UMIST PIRC hydrogen consortium meeting, Manchester, April 1998.

[3] Hallale N, Liu F. Refinery hydrogen management for clean fuels production[J]. Advances in Environmental Research, 2001, (6): 81-98.

[4] 孙慧恒. 炼油厂氢气网络的窄点分析[J]. 炼油设计, 2001, 31(10): 38-40. (Sun H H. Pinch analysis of hydrogen network in refinery[J]. Petroleum Refinery Engineering, 2001, 31(10): 38-40. )

[5] 林海波. 炼油厂生产计划及氢网络研究[D]. 杭州: 浙江大学. 2002. (Lin H B. Studies on refinery optimization of production planning and optimization of hydrogen network[D]. Hangzhou: Zhejiang University. 2002. )

作者简介：

张毅(1977-), 男, 硕士研究生, 从事化工系统工程方面的研究;  
阳永荣(1962-), 男, 教授, 博士, 从事化学反应工程和化工系统工程方面的研究;  
刘军(1977-), 男, 硕士研究生, 从事化工系统工程方面的研究;  
郭宏新(1962-), 男, 高级工程师, 从事化工系统工程方面的研究;  
唐应刚(1981-), 男, 博士研究生, 从事化工系统工程方面的研究。