

低压脱甲烷系统优化分析

王弘斌 周 沛 宋维端

(华东理工大学化学工程系, 上海 200237)

摘 要 在对低压脱甲烷系统进行计算机模拟的基础上,建立了以系统乙烯损失与能耗之和为目标函数的最优化数学模型;采用可行路径序贯模块法为最优化计算策略,结合广义既约梯度法对该系统实施优化计算,找出了对系统目标函数影响较大的可调决策变量及其最优化条件.对优化决策变量的选择及中等规模化工系统的优化策略进行了有益的探索.

关键词 优化 最优策略 黑箱法 GRG 法

引言

在裂解气深冷分离过程中,脱甲烷系统冷耗约占分离总冷耗的 50% 以上.低压脱甲烷流程由于系统压力较低,使甲烷与乙烯的相对挥发度变大,从而有利于甲烷的分离,因此较之高压法其脱甲烷塔的回流比可大幅度降低,生产每吨乙烯约可降低冷耗 800 MJ^[1].但低压法其塔顶温度需低至 -130℃,且塔顶尾气中的乙烯损失大于高压法.在实际生产中希望以最小的能耗获取最大的乙烯回收率.本文在对低压法脱甲烷系统进行模拟计算的基础上,尝试对该系统的最优化计算.

本文分析的低压脱甲烷系统(见图 1),由 29 个单元模块、55 股流股组成,每股流股包含 17 个变量(组成、温度、压力),系统描述方程数可达数千个,其中包括物料、热量衡算方程,相平衡方程,物性估算方程等.

由于该系统是复杂多嵌套再循环回路系统,模拟计算中需进行反复迭代,因此在实施最优化计算时,必须选择一种适宜的优化策略以及与之相匹配的优化数学方法.由于作者对该系统已有比较可靠且计算稳定的序贯模块法模拟计算经验,故本研究采用基于序贯模块法的可行路径算法即黑箱法^[2,3]的最优化策略来实施系统的优化计算.

黑箱法的优化策略是在序贯模块法系统模拟的外层再套一层最优化迭代.系统模拟视为一黑箱模型,即给定系统输入以及 1 组决策变量值可通过黑箱模型计算出系统输出及其他中间变量,并由此估算出目标函数(技术经济指标),然后采用非线性规划,本文采用广义既约梯度(GRG)法^[4]调整决策变量的值,逐步使目标函数趋于极值,直至收敛于最优解.上述优化算法的特点是计算比较稳定且效率较高,但每次最优化迭代均需进行全系统模拟,需满足系统描述方程及约束条件,即每次迭代系统模拟必需收敛.

1 系统优化模型的建立及决策变量的确定

该系统的技术经济指标主要有单位时间内系统的乙烯损失 L_F 和系统能耗(甲烷致冷压

1995-04-11 收到初稿,1995-07-10 收到修改稿.

联系人及第一作者:王弘斌,男,51 岁,硕士,副教授

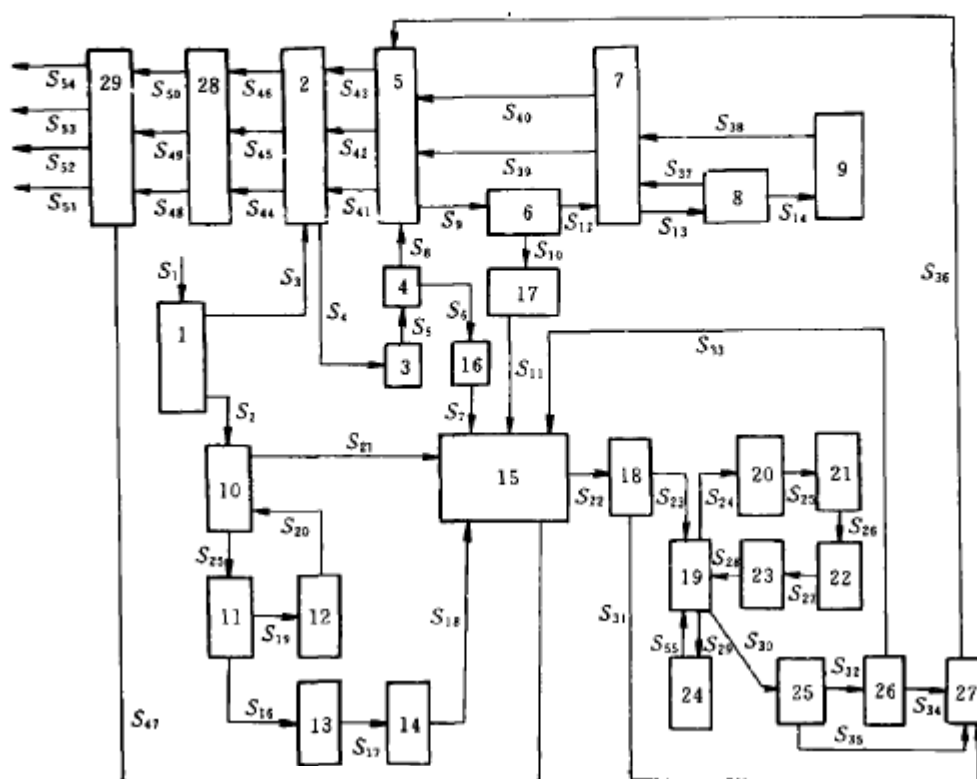


图 1 低压脱甲烷系统结构框图

Fig.1 Structure graph of low pressure demethanization process

1—进料分离器 I; 2—冷箱 I; 3—进料冷却器; 4—进料分离器 II; 5—冷箱 II; 6—进料分离器 III; 7—冷箱 III; 8—氢、甲烷分离器; 9—减压阀 I; 10—进料换热器; 11—分割器 I; 12—减压阀 II; 13—进料过冷器; 14—减压阀 III; 15—脱甲烷塔; 16—减压阀 IV; 17—减压阀 V; 18—分割器 II; 19—回流换热器; 20—甲烷致冷压缩机 I; 21—换热器; 22—甲烷致冷压缩机 II; 23—甲烷制冷剂冷却器; 24—甲烷冷凝器; 25—回流罐; 26—分割器 III; 27—混合器; 28—冷箱 IV; 29—冷箱 V;
 S_1 —裂解气 S_{51} —脱甲烷塔釜出料; S_{52} —富氢; S_{53} —低压甲烷; S_{54} —高压甲烷

缩机的电耗) C_p . 定义优化目标函数为

$$F = L_E U_1 + C_p U_2 \quad (1)$$

最优化模型的等式约束即为系统模拟方程组. 为了确定优化决策可调变量, 利用系统模拟的方法对 6 个实际操作可调变量 T_1 、 T_2 、 T_3 、 R_1 、 R_2 、 R_3 对目标函数值 F 的影响进行分析, 其结果示于图 2(a)~图 2(f)中.

从图 2(a)、(b)和图 2(d)可见 T_1 、 T_2 和 R_1 对目标函数值 F 的影响很小, 故这 3 个变量可排除在优化决策变量之外, 不予考虑. 从图 2(c)、(f)看出, T_3 、 R_3 变化时 F 是一下凹曲线, 即存在一个使目标函数值最小的谷底. T_3 变化时谷底在 140K 左右, 而 R_3 约在其值为 0.20 附近出现最小的 F 值. 从图 2(e)看出, 随着 R_2 上升 F 值单调下降. 通过上述分析可确定 T_3 、 R_3 和 R_2 为该优化问题和关键决策变量. 由于 R_2 与 F 呈线性递减关系, 本文不直接将 R_2 列入优化决策变量的范围, 而分别在其设计值附近设定 4 个值 0.60、0.59、0.57946 和 0.56, 分别加以研究, 其中 0.57946 为原设计值. 最后该最优化问题的目标函数确定为

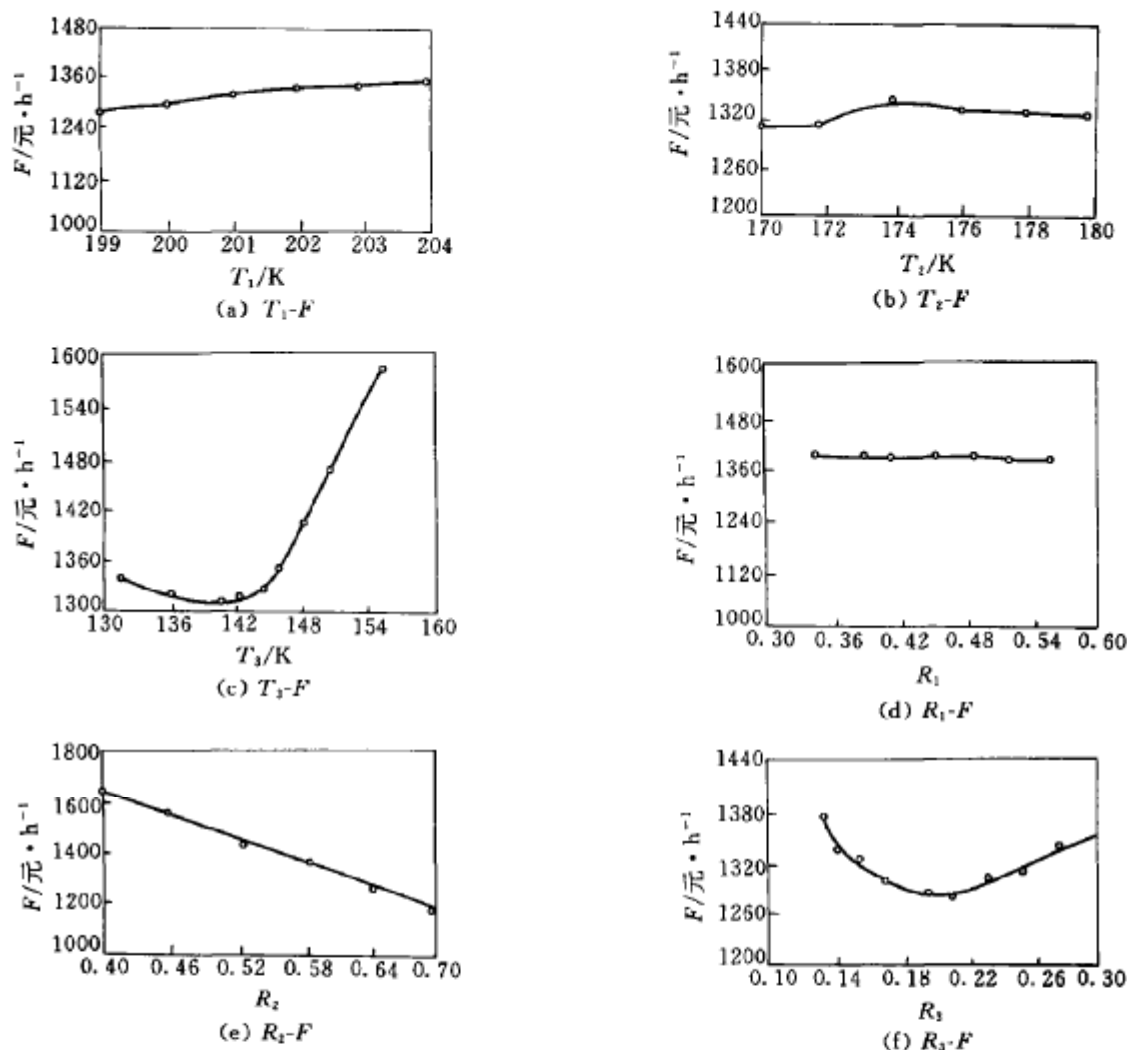


图 2 可调操作变量对系统目标函数值的影响

Fig.2 Variable T_1 , T_2 , T_3 , R_1 , R_2 and R_3 vs. F

$$F = f(R_3, T_3) \quad (2)$$

优化问题可陈述为寻找在不同的 R_2 值下使系统乙烯损失与能耗之和最低的脱甲烷塔回流比 R_3 和进料分离器Ⅲ的温度 T_3 。通过上述分析,该系统的最优化数学表达可写作

$$\min F(R_3, T_3)$$

约束条件

$$C(R_3, T_3) = 0$$

$$134.2 < T_3 < 154.2 \quad (3)$$

$$0.125 < R_3 < 0.4$$

式(3)中的等式约束 $C(R_3, T_3) = 0$ 实际上是包含优化决策变量的系统模拟方程组;而两个不等式约束则是为了避免优化搜索范围过大造成模拟计算困难而给出的限制条件,其依据是系统模拟预分析时,这两个变量与目标函数值的关系中出现最小值附近的一个范围。

2 最优化问题的解法

最优化数学模型式(3)是一个具有等式约束和不等式约束条件的非线性规划问题,采用

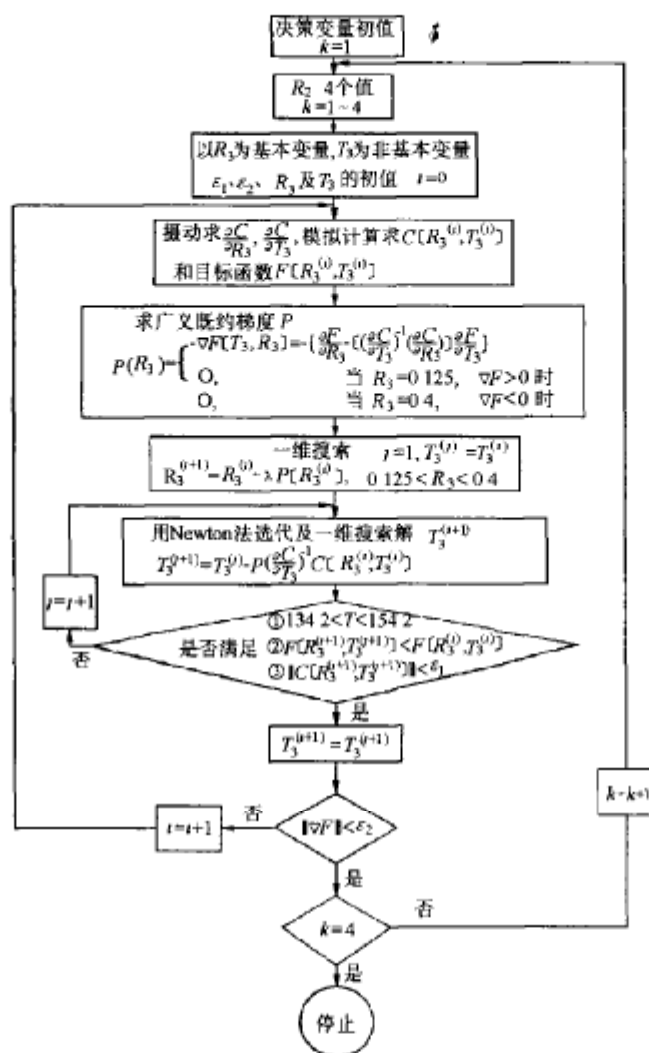


图 3 广义既约梯度法解脱甲烷系统优化问题框图

Fig.3 Graph of optimized demethanization process with GRG

目前计算效率、稳定性均为上乘的算法之一——广义既约梯度法⁽⁴⁻⁶⁾求解。本文在 GRG 算法的基础上,针对该系统的具体情况进行了适当的修改和简化,详细计算过程见图 3。通过摄动(差分法求近似偏导数)和模拟计算求出计算 GRG 所必须的偏导数 $\frac{\partial C}{\partial R_3}$ 、 $\frac{\partial C}{\partial T_3}$ 、 $\frac{\partial F}{\partial R_3}$ 、 $\frac{\partial F}{\partial T_3}$ 及每次迭代的 F 值。以 R_3 为基本变量, T_3 为非基平变量,进而求出广义既约梯度为

$$\nabla F = \frac{\partial F}{\partial R_3} - \left[\left(\frac{\partial C}{\partial T_3} \right)^{-1} \left(\frac{\partial C}{\partial R_3} \right) \right] \frac{\partial F}{\partial T_3} \quad (4)$$

因考虑到不等式约束,负梯度方向应为

$$P(R_3) = \begin{cases} 0, & \text{当 } R_3 = 0.125 \text{ 且 } \nabla F > 0 \text{ 时} \\ 0, & \text{当 } R_3 = 0.4 \text{ 且 } \nabla F < 0 \text{ 时} \\ -\nabla F(R_3, T_3) \end{cases} \quad (5)$$

然后按下式

$$R_3^{(i+1)} = R_3^{(i)} + \lambda P(R_3) \quad (6)$$

进行一维搜索求出新的基本变量 $R_3^{(i+1)}$, 同时满足不等式约束 $0.125 < R_3 < 0.4$. 然后通过解等式约束解出非基本变量 T_3 , 本文采用离散牛顿迭代附加一维搜索, 并判别是否满足 T_3 的不等式约束等 3 个判据, 从而得到更新的 $T_3^{(i+1)}$, 完成一次迭代. 如此反复迭代直至满足 $\|\nabla F\| < \epsilon_2$, 最终解出在一个 R_2 设定值下的最优解. 改变 R_2 的值同样也可得到另外 3 组解. 由于在用 GRG 优化算法时, 无论是偏导数计算或是目标函数计算均需用序贯模块法来模拟系统, 故每次模拟必需使模拟问题有解, 这是可行路径法的关键.

本文采用微机 386/sx33 进行该系统的优化计算, 优化一组操作点约用机时 15 h, 用序贯模块法进行一次流程模拟约用机时 1 h.

3 最优化计算结果及讨论

按上述计算过程, 在序贯模块法模拟系统的基础上结合 GRG 最优化法对该系统实施最优化计算, 计算结果见附表.

不同 R_2 下优化结果
Optimization results in various R_2 values

R_2	R_3	T_3/K	$F/\text{元}$	$F_d/\text{元}$	$B/\text{万元} \cdot \text{a}^{-1}$
0.60	0.208	140.2	1725.2	1755.2	24.04
0.59	0.218	141.2	1730.9	1755.2	19.50
0.57946	0.164	137.3	1745.13	1755.2	8.08
0.56	0.171	137.9	1789.1	1755.2	-27.09

* 原设计值

3.1 从附表看出, 当 R_2 取不同值时, 系统的最优目标函数值 F 是不同的, 为达到系统操作的最佳效果, 应将可调变量调整到相应的数值上.

3.2 附表第 3 行列出了当可调变量取原设计值时, 本优化计算的最佳目标函数值 F 与原设计计算出的最佳目标函数值 F_d 相差不大.

3.3 附表最后一列示出 4 个不同 R_2 值时, 通过优化计算在最佳操作条件下的经济效益以设计值为比较基准. 经济效益定义为: 以年开工 8000 h 计

$$B = 8000(F_d - F)/10000 \text{ 万元} \cdot \text{a}^{-1}$$

从表中可知随着 R_2 值的逐步提高, 则最优操作条件下的经济效益也将逐步上升, 但上升趋势渐趋平缓(见图 4). 因此在不影响正常操作及生产负荷时, 应尽可能在较大的 R_2 值下操作, 即适当提高脱甲烷塔塔顶出料气液比, 同时确保其他操作条件(R_3 和 T_3)控制在相应的数值附近, 以期获得最佳的效果.

4 结论

(1) 低压脱甲烷塔进料分离器 I、II 的操作温度对该系统的目标函数值(冷耗与乙烯损

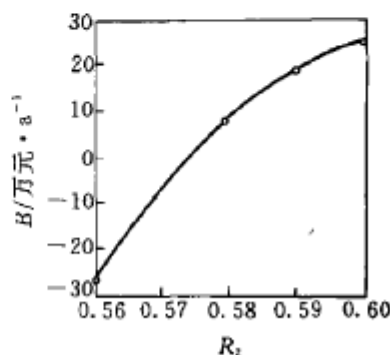


图 4 不同 R_2 值时的 B

Fig 4 R_2 values vs. B

失的综合指标)的影响很小;而脱甲烷塔的回流比与进料分离器Ⅲ的操作温度是影响脱甲烷系统综合经济指标的关键决策变量。

(2) 随着流量比 R_2 的增大目标函数值单调下降,在生产负荷允许的情况下,可以在较大的 R_2 值下操作,并使 R_3 和 T_3 设置在与之相应的优化操作点附近,以期获取较好的优化效果。

(3) 采用“黑箱法”对中等规模的化工过程系统进行最优化计算是简便、有效、可行的,此法不失为是一种实用的化工系统优化方法。

符 号 说 明

B ——经济效益, 万元·a ⁻¹	R_3 ——脱甲烷塔回流量(S_{33})与塔顶出料量(S_{36})流量比
C_p ——甲烷致冷压缩机 I、II 耗电量, J·h ⁻¹	S ——流股
F ——目标函数值, 元·h ⁻¹	T_1, T_2, T_3 ——分别为进料分离器 I、II、III 的操作温度, K
F_d ——按原设计值计算出的最佳目标函数值, 元·h ⁻¹	U_1 ——乙烯产品单价($U_1 = 3350$ 元·t ⁻¹)
L_E ——乙烯损失, t·h ⁻¹	U_2 ——工业用电单价, ($U_2 = 1.67 \times 10^{-4}$ 元·J ⁻¹)
i, j, k ——迭代或重新计算次符号	ϵ_1, ϵ_2 ——小正数($\epsilon_1 = 1 \times 10^{-3}, \epsilon_2 = 1 \times 10^{-2}$)
R_1 —— S_{19} 与 S_{16} 流量比	λ, ρ ——一维搜索因子
R_2 —— S_{31} 与 S_{32} 流量比	

参 考 文 献

- 1 李作政, 冷寅正 乙烯生产与管理 北京: 中国石化出版社, 1992. 499
- 2 杨友麒. 实用化工系统工程 北京: 化学工业出版社, 1989 368 ~ 373
- 3 高松武一郎. 化工过程系统工程. 张能力, 沈静珠译. 北京: 化学工业出版社, 1981 248 ~ 261
- 4 朱道立. 大系统优化理论与应用. 上海: 上海交通大学出版社, 1987. 219 ~ 222
- 5 叶庆凯, 王肇明 优化与最优化控制中的计算方法 北京: 科学出版社, 1986 176
- 6 杨冀宏, 麻德贤 过程系统工程导论. 北京: 烃加工出版社, 1989 153 ~ 155

OPTIMIZATION ANALYSIS OF LOW PRESSURE DEMETHANIZATION PROCESS

Wang Hongshi, Zhou Pei and Song Weiduan

(Department of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Abstract In this paper based on simulating computation of low - pressure demethanization process in an ethylene plant, an optimization mathematical model using the sum of ethylene loss and energy consumption of the system as its objective function is established. The optimum operation conditions and key operation variables are given by the "black box" method combined with the generalized reduced gradient method, one of the most reliable tools for optimum design. A useful study is carried out on the selection of optimal key variables and the optimal strategy of medium - size flow - sheeting system.

Keywords optimization, optimal strategy, black box, GRG