

中变系统的链能达性分析*

陈铁军

(郑州工学院计算机与自动化系)

摘 要: 本文结合机理分析和经验知识, 为中变系统建立起链型模型, 并对它进行了链能达分析。该模型在实际中得到了成功应用。

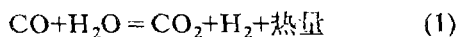
关键词: 建模, 能达性

中温变换系统是合成氨生产过程中的一个重要环节⁽¹⁾, 工艺上对它提出了较严格的控制要求。这是一个多输入多输出受控系统, 但现有的控制方案大都以单变量控制方法为基础, 并且也没有出现相应的模型, 只是简单地利用 PID 算法来试凑, 因此难以获得良好控制效果,

本文根据链系统方法⁽²⁾, 对中变系统实行因果分析, 找出主要的因果关系链, 构成该系统的一个因果链结构, 从而建立起一个链系统。这是一个三输入六输出的关联系统, 由形成三条因果链的十二个子系统构成。文中对该系统进行了链能达性, 指出该系统存在一个链能达的链系统; 而如果因果链选择不当, 则会破坏它的这一性质。该模型在实际中得到了成功应用, 收到满意的控制效果。

1 中变系统的因果分析和链结构

中变系统的工艺流程框图如图 1 所示。来自脱硫工段的气体进入饱和塔, 与热水逆流相遇, 被加热增湿, 出塔后与蒸汽混合, 大部分入热交换器进一步加热, 小部分经冷付阀直接进入中变 I 段以调整 I 段温度。经热交换的混合气入 I 段, 在触媒存在的条件下, 发生反应:



出 I 段的气体经换热后入 II 段, 同样发生反应 (1); 再经换热入 III 段。又经换热送后续工段。

根据其工艺流程, 通过如下因果分析, 可以

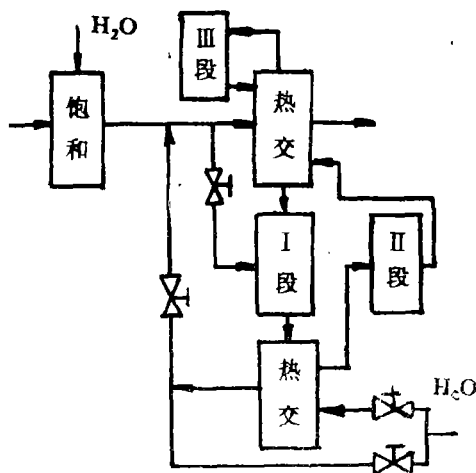


图 1 中变系统流程框图

* 收稿日期: 1990.04

得到以一氧化碳含量, I 段温度, 和 II 段温度为链尾的三条因果链。

1.1 一氧化碳链 L_1

用 Z_{1K_1} 表示中变出口一氧化碳含量; K_1 是 L_1 的长度, 在分析中确定。影响一氧化碳 Z_{1K_1} 的主要因素是 I、II 和 III 段温度, 蒸汽流量, 半水煤气流量和中变入口一氧化碳含量。其中 I、II 的温度是受控输出, 按照[2]中的讨论, 它们不能用作(间接)控制输入。在生产中, III 段温度总满足工艺要求, 且变化甚微, 不必施加控制。半水煤气流量和入口一氧化碳含量取决于生产负荷和造气工段生产情况, 不能随意调节。而蒸汽流量可通过改变蒸汽阀开度加以控制, 所以蒸汽阀开度 Z_{10} , 蒸汽流量 Z_{11} , 和出口一氧化碳含量 Z_{12} , 可构成因果链 L_1 , 且 $K_1=2$ 。

$$L_1 = \{ \langle Z_{10}, Z_{11} \rangle, \langle Z_{11}, Z_{12} \rangle \} \quad (2)$$

1.2 I 段温度链 L_2

I 段温度是入炉气体带入的热量、反应热和出 I 段气体带走热量的总体积累效应。入炉气体温度在敏点能迅速反映出来; 反应热则与蒸汽流量 Z_{21} , 入口一氧化碳含量, 半水煤气流量, I 段温度及触媒活性有关; 带走的热量取决于半水煤气流量和 I 段温度。而敏点温度受热交换器温度即 II 段温度以及冷付阀开度控制。因此, I 段温度 Z_{2K_2} 的间接控制因变量可在蒸汽流量 Z_{11} 和 I 段敏点温度中选择一个。 Z_{11} 已选定作为 L_1 的一个基本因变量, 这里取 I 段敏点温度作为 Z_{2K_2-1} , 并令冷付阀开度为 Z_{20} , 所以, $K_2=2$, 且:

$$L_2 = \{ \langle Z_{20}, Z_{21} \rangle, \langle Z_{21}, Z_{22} \rangle \} \quad (3)$$

如果选 Z_{11} 作为 Z_{22} 的基本输入, 则有另一条链 L'_2 ,

$$L'_2 = \{ \langle Z_{10}, Z_{11} \rangle, \langle Z_{11}, Z_{22} \rangle \} \quad (4)$$

1.3 II 段温度链 L_3

与 I 段温度链 L_2 的分析类似, 取 II 段热点温度 Z_{32} , 敏点温度为 Z_{31} , 热交换阀开度为 Z_{30} , $K_3=2$, 有:

$$L_3 = \{ \langle Z_{30}, Z_{31} \rangle, \langle Z_{31}, Z_{32} \rangle \} \quad (5)$$

中变系统的链结构由此三条因果链构成, 它决定了一个三输入六输出关联系统的结构模式。图 2 是中变系统框图。

以子系统级模型给出的中变系统的链型模型取形为:

$$Z_{ij}(t+1) = F_{ij}(X_{ij}(t))Z_{ij-1}(t-d_{ij-1}^u) \quad (6)$$

$j=1, 2; i=1, 2$; t 为离散时间。 $X_{ij}(t)$ 是变量串, 根据前述分析, 有:

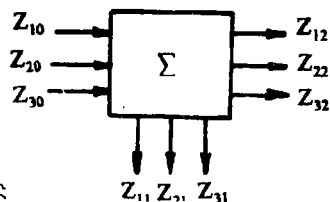


图2 中变系统框图

$$\left. \begin{aligned} X_{11}(t) &= \varphi \\ X_{12}(t) &= \{ Z_{22}(t-d_{22}^{12}), Z_{32}(t-d_{32}^{12}), Z_{11}(t-d_{11}^{12}) \} \\ X_{21}(t) &= \{ Z_{21}(t), Z_{32}(t-d_{32}^{21}) \} \\ X_{22}(t) &= \{ Z_{11}(t-d_{11}^{22}), Z_{22}(t) \} \\ X_{31}(t) &= \{ Z_{31}(t), Z_{22}(t-d_{22}^{31}) \} \\ X_{32}(t) &= \{ Z_{32}(t), Z_{11}(t-d_{11}^{32}) \} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

φ 是空集。 $F_{ij}(\cdot)(\cdot): \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, 是因果映射。
 d_{lm}^{ij} 是滞后时间。由此可画出中变系统的因果关联框图, 如图 3 所示。

2 链能达性分析

根据[2]中的结果, 对于控制输入的个数与受控制输出的个数相等的系统, 如果对于某 $K \in \{-1 \sim p_2-1\}$, 存在 p_1 维行交换矩阵 P , 使:

$$\alpha(K) \neq \varphi \quad (8)$$

则该系统存在一个链能达的链系统。这里, p_2 和 p_1 分别是中间测量输出和受控输出的个数, φ 是空集。 $\alpha(K)$ 的定义如下。

设系统的控制因果关联矩阵 $R = \{r_{ij}\}$, $j = 1 \sim q_1 + p_2$, $i = 1 \sim p_1 + p_2$; q_1 是控制输入的个数。设 $V = [y_{p_1+1}, \dots, y_{p_1+p_2} | u_1, \dots, u_{q_1}]^T \triangleq [v_1, v_2, \dots, v_{p_2+q_1}]^T$ 通过 R 对 $Y = [y_1, \dots, y_{p_1} | y_{p_1+1}, \dots, y_{p_1+p_2}]^T$ 起控制作用。亦即当 v_j 是 y_i 的控制因变量⁽²⁾时, $r_{ij} = 1$, 否则 $v_{ij} = 0$ 。矩阵 R 是一个 $(p_1 + p_2) \times (q_1 + p_2)$ 维布尔矩阵。依 Y 和 V 的分块方式, 把它分块成为:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \quad (9)$$

R_{11} , R_{12} , R_{21} , R_{22} 分别是 $p_1 \times p_2$, $p_1 \times q_1$, $p_2 \times p_2$ 和 $p_2 \times q_1$ 维布尔矩阵。设 \cup 和 \cap 分别表示布尔矩阵的逻辑和与逻辑乘, 并用 R_{21}^{\cap} 表示 i 个布尔方阵 R_{21} 的逻辑乘,

$R_{21}^{\cap} \triangleq I$, I 是单位矩阵。设 $p_1 = q_1$, 令:

$$R_{12}(K) = \begin{cases} R_{12}, & K = -1 \\ R_{12} \cup [R_{11} \cap (\bigcup_{s=0}^K R_{21}^{\cap}) \cap R_{22}], & K \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$A(P, K) = P \cap R_{12}(K) \quad (11)$$

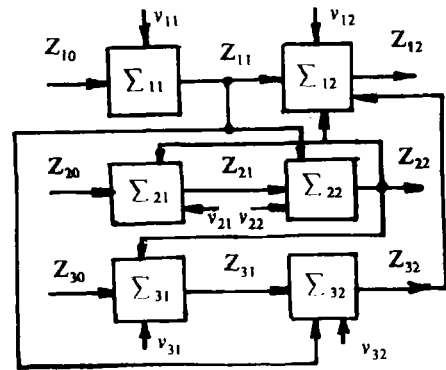


图 3 中变系统因果关联框图

P 是行交换矩阵。设 $a_{ii}(K)$ 表示 $A(P, K)$ 的对角元素,

$$\begin{aligned} a_{ii}(-1) &= r_{h_i m_i}^{12} \\ a_{ii}(K) &= r_{h_i m_i}^{12} \bigcup \bigcup_{s_1=1}^{p_2} (r_{h_i s_1}^{11} \cap r_{s_1 m_i}^{12}) \bigcup \bigcup_{s_1=1}^{p_2} \bigcup_{s_2=1}^{p_2} (r_{h_i s_1}^{11} \cap r_{s_1 s_2}^{21} \cap r_{s_2 m_i}^{22}) \\ &\quad \cdot \bigcup \cdots \bigcup \bigcup_{s_1=1}^{p_2} \cdots \bigcup_{s_{k+1}=1}^{p_2} (r_{h_i s_1}^{11} \cap r_{s_1 s_2}^{21} \cap \cdots \cap r_{s_k s_{k+1}}^{21} \cap r_{s_{k+1} m_i}^{22}), \quad K \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

$r_{h_i m_i}^{12}$ 是 R_{12} 的第 h_i 行第 m_i 列元素, $r_{h_i s_1}^{11}$, $r_{s_1 s_h}^{21}$ 和 $r_{s_r m_i}^{22}$ 类似定义。令:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_i(-1) &= \{ (12, h_i) | r_{h_i m_i}^{12} = 1 \} \\ \alpha_i(0) &= \{ (22, s_1) | r_{h_i s_1}^{11} \cap r_{s_1 m_i}^{22} = 1, s_1 \in \{ 1 \sim p_2 \} \} \\ \alpha_i(1) &= \{ (22, s_2), (21, s_1) | r_{h_i s_1}^{11} \cap r_{s_1 s_2}^{21} \cap r_{s_2 m_i}^{22} = 1, \\ &\quad s_1 \neq s_2, s_1, s_2 \in \{ 1 \sim p_2 \} \} \\ &\vdots \\ \alpha_i(K) &= \{ (22, s_{k+1}), (21, s_k), \cdots, (21, s_1) | r_{h_i s_1}^{11} \cap r_{s_1 s_2}^{21} \cap \cdots \cap r_{s_k s_{k+1}}^{21} \\ &\quad \cdot \cap r_{s_{k+1} m_i}^{22} = 1, s_1 \neq s_2 \neq \cdots \neq s_k, s_j \in \{ 1 \sim p_2 \}, j = 1 \sim k \} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \alpha(K) &= \{ \alpha_i(j_i) \neq \varnothing | j_i \in \{ -1, 0, \cdots, k \}, i = 1 \sim p_1, \alpha_i(j_i) \cap \alpha_h(j_h) = \varnothing, \\ &\quad l \neq h, l, h = 1 \sim p_1 \} \end{aligned} \quad (14)$$

对于中变系统, 根据前边的因果分析, 其控制因果关联矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$R_{12}(-1) = R_{12} = [0] \quad (16)$$

$$R_{12}(0) = R_{12} \cup [R_{11} \cap R_{22}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1(0) &= \{ (22, 1) \mid r_{11}^{11} \cap r_{11}^{22} = 1 \} \\ \alpha_2(0) &= \{ (22, 2) \mid r_{22}^{11} \cap r_{22}^{22} = 1 \} \\ \alpha_3(0) &= \{ (22, 3) \mid r_{33}^{11} \cap r_{33}^{22} = 1 \} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

从而有:

$$\alpha(0) \neq \varphi \quad (19)$$

即中变系统存在一个链能达的链系统。但是, 如果选(4)中的 L_2' 作为 I 段温度链, 不难验证, 该系统就是链不能达的。

链能达性是能控性的一个必要条件。所以对任意一个实际系统进行因果分析, 确定出其因果链结构之后, 应当验证它的链能达性, 以使所获得的链系统具备这一性质。

3 中变系统的动态数学模型

在获得因果链结构的条件下, 可根据机理分析, 经验知识和数理统计的方法, 为中变系统建立显含因果链结构的数学模型。

根据[1]中的分析, 可以知道, 中变系统的模型取形为:

$$\begin{aligned} Z_{12}(t+1) &= f_1(Z_{11}(t-l_{11})/y_{13}, Z_{32}(t-l_{12}), Z_{31}(t-l_{13})) \\ \Delta Z_{11}(t+1) &= a_{11}\Delta Z_{10}(t) + b_{11}v_{11} \\ dZ_{22}(t)/dt &= -b_{12}(Z_{11}(t-l_{21}+v_{12})(Z_{22}(t)-Z_{21}(t-l_{22}))/s_1 \\ &\quad + b_{22}f_2(Z_{11}(t-l_{23}), Z_{22}(t)) \\ Z_{21}(t+1) &= a_{21}Z_{21}(t) + a_{22}Z_{20}(t-d_{20}^{21}) + a_{23}Z_{32}(t-d_{32}^{21}) + v_{21} \\ dZ_{32}(t)/dt &= -(a_{31}Z_{11}(t-l_{31}) + v_{12}a_{32})Z_{32}(t) - Z_{31}(t-l_{32})/s_2 \\ &\quad + f_3(Z_{11}(t-l_{33}), Z_{32}(t)) \\ Z_{31}(t+1) &= a_{41}Z_{31}(t) + a_{42}Z_{30}(t-d_{30}^{31}) + a_{43}Z_{22}(t-d_{22}^{31}) \end{aligned}$$

s_1, s_2 分别是 I、II 段触媒层高度, $f_i, i=1\sim 3$ 是某非线性函数。 ΔZ 表示 Z 相对于平衡值的偏差。 a_{ij}, b_{sk} 都是待定系数。

在实际中, 为了达到中变出口一氧化碳指标, 一般要求蒸汽量输入都有一定余量, 再考虑到 I、II 段热点温度都严格要求控制在触媒活性范围以内, 因此可以假设 f_2 和 f_3 正比于中变入口一氧化碳含量。对 f_1 进行线性化处理, 对所有方程进行离散化处理, 有:

$$\begin{aligned} \Delta Z_{11}(t+1) &= \theta_{11}\Delta Z_{10}(t) + v_{11} = F_{11}(X_{11}(t))\Delta Z_{10}(t) \\ \Delta Z_{12}(t+1) &= \theta_{21}\Delta Z_{11}(t-d_{11}^{12})/(Z_{01}v_{12}) + \theta_{22}\Delta Z_{32}(t-d_{32}^{12}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \theta_{23} \Delta Z_{22}(t - d_{22}^{12}) \\
& = F_{12}(X_{12}(t)) \Delta Z_{11}(t - d_{11}^{12}) \\
& \Delta Z_{21}(t + 1) = \theta_{31} \Delta Z_{21}(t) + \theta_{32} \Delta Z_{32}(t - d_{32}^{22}) + \theta_{33} \Delta Z_{20}(t - d_{20}^{21}) + v_{13} \\
& = F_{21}(X_{21}(t)) \Delta Z_{20}(t - d_{20}^{21}) \\
& \Delta Z_{22}(t + 1) = \Delta Z_{22}(t) + \theta_{41}(Z_{11}(t - d_{11}^{22}) + v_{12})(Z_{21}(t - d_{11}^{22}) - Z_{22}(t)) + \theta_{42} Z_{01} \\
& = F_{22}(X_{22}(t)) \Delta Z_{21}(t - d_{21}^{22}) \\
& \Delta Z_{31}(t + 1) = \theta_{51} \Delta Z_{31}(t) + \theta_{52} Z_{30}(t - d_{30}^{31}) + \theta_{53} \Delta Z_{22}(t - d_{22}^{31}) \\
& = F_{31}(X_{31}(t)) \Delta Z_{30}(t - d_{30}^{31}) \\
& \Delta Z_{32}(t + 1) = \Delta Z_{32}(t) + (\theta_{61} Z_{11}(t - d_{11}^{32}) + \theta_{62} v_{12}) \cdot (-Z_{32}(t) \\
& + Z_{31}(t - d_{31}^{32})) + \theta_{33} Z_{01} \\
& = F_{32}(X_{32}(t)) \Delta Z_{31}(t - d_{31}^{32})
\end{aligned}$$

其中的 θ_{ij} 和 d_{lm}^s 可根据 AIC 准则^[3] 予以确定。

前述能达性分析方法, 以及所给出的显含因果链结构的链形模型, 在某化肥厂中变系统控制中得到成功应用。这种方法也能应用于其它系统的控制之中。

参 考 文 献

- (1) 姜圣阶等. 合成氨工学. 石油化学工业出版社, 1978
- (2) 陈铁军. 链系统方法及其应用. 博士学位论文. 西安交通大学研究生院, 1989
- (3) H.Akaike. A new look at the statistical model identification, IEEE Trans. Aut. Contr., AC-19, 1974

The Chain Reachability Analysis for a Medium Temperature Conversion System

Chen Tiejun

(ZhengZhou Institute of Technology)

Abstract: Combining the mechanism analysis and the experience knowledge, the paper gives the chain type of model for a medium temperature conversion system, and obtains the results of the chain reachability analysis for it. The model has been used successfully in practice.

Keywords: modelling, reachability