

蒸馏塔的分散化控制

张红艺 文传源

(江 西 大 学) (北京航空航天大学)

摘要

本文在不同的分散化信息结构下, 对一个二元蒸馏塔分别给出了静态分散化和一阶动态分散化干扰解耦控制器的设计。结果表明, 反馈后蒸馏塔的产品输出完全不受干扰量进料组分的影响。

关键词: 蒸馏塔, 分散化, 干扰解耦。

一、引言

本文试图将分散化干扰解耦原理^[1]应用于一个二元蒸馏塔的多变量控制^[4]。在分散化信息结构下, 结果表明, 可以通过调节二个控制站的控制量(回流流速, 汽化速度)使得二元蒸馏塔的产品输出(馏出组分, 底釜产品)不受干扰量(进料组分)的影响。根据每个控制站所获得的信息结构, 可以相应地设计出静态分散化控制器、一阶动态分散化控制器。而且, 随着每个控制站所能获得信息数量的减少, 分散化控制器阶数可能要相应地增加。最后对由 9 块塔板、1 个冷凝器和 1 个再沸器组成的二元蒸馏塔进行了仿真实验。

二、分散化干扰解耦反馈控制器的设计

在理想条件下^{[2]-[5]}, 将一个二元蒸馏塔的运动方程在定态下线性化, 可以获得一个具有二个控制站的线性状态方程^[4]

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= A\mathbf{x}(t) + B_1\mathbf{u}_1(t) + B_2\mathbf{u}_2(t) + E\mathbf{q}(t), \\ \mathbf{z}(t) &= D\mathbf{x}(t),\end{aligned}\tag{2.1}$$

其中 $\mathbf{x} \in R^n$, $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$ 分别是馏出液组分和底釜产品组分, $\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_{n-1}$ 分别是塔板组分, 且假定 $\mathbf{x}_f (2 \leq f \leq n-1)$ 是进料板组分; $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$ 分别是回流流速变化和蒸汽流流速变化的控制量; $\mathbf{z} \in R^2$, $\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2$ 分别是馏出液组分和底釜产品组分, 它们为受控量。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & & & & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & & & \\ & a_{32} & a_{33} & a_{34} & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ 0 & a_{n-1,n-2} & a_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} & & \\ & & a_{n,n-1} & a_{n,n} & & \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ b_{2i} \\ \vdots \\ b_{n-1,i} \\ b_{n,i} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ d_f \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

现假定每个控制站的量测输出为

$$y_i(t) = C_i x(t), \quad i = 1, 2. \quad (2.2)$$

下面将根据 C_i 的结构, 分别给出几种不同的分散化反馈控制器的设计。

1) 给定 ($3 \leq f \leq n - 1$)

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \ddots & \vdots \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \in R^{(n-1) \times n}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \in R^{(n-2) \times n},$$

这表明站 1 不能量测底釜产品组分, 而站 2 不能量测馏出液组分和第 1 块塔板组分。

选取子空间 $\mathcal{V}_i = \text{span}\{e_3, e_4, \dots, e_{n-1}\}$, $i = 1, 2, 3, 4$, 其中 $e_i \in R^n$ 是单位基底。根据文[1], 可验证子空间集 $(\mathcal{V}_i, i \in \mathbf{4})$ 是个 DSIS。因为 $\text{im } E \subset \mathcal{V}_1 = \mathcal{V}_4 \subset \ker D$, 所以存在静态分散化控制器使干扰解耦。令 $K_1 = [k_{11} \ k_{12} \ \cdots \ k_{1,n-1}]$, $K_2 = [k_{21} \ k_{22} \ \cdots \ k_{2,n-2}]$ 分别是第 1 个控制站和第 2 个控制站的反馈增益, 直接计算可以确定 K_i 的参数。

$$K_1 = [k_{11} \ k_{12} \ k_{13} \ 0 \cdots 0 \ k_{1,n-1}], \quad \begin{array}{c|c|c} \hline & \text{自由} & \text{固定} & \text{固定} \\ \hline \end{array} \quad (2.3)$$

$$K_2 = [k_{21} \ 0 \cdots 0 \ k_{2,n-3} \ k_{2,n-2}], \quad \begin{array}{c|c|c} \hline \text{固定} & \text{固定} & \text{自由} \\ \hline \end{array} \quad (2.4)$$

其中

$$k_{13} = -\frac{1}{\mu} b_{n2} a_{23}, \quad k_{21} = \frac{1}{\mu} b_{n1} a_{23},$$

$$k_{1,n-1} = \frac{1}{\mu} b_{22} a_{n,n-1}, \quad k_{2,n-3} = -\frac{1}{\mu} b_{21} a_{n,n-1},$$

$$\mu = b_{21} b_{n2} - b_{n1} b_{22}.$$

2) 研究情形 ($4 \leq f \leq n - 2$)

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \ddots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \in R^{(n-2) \times n}, \quad C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \in R^{(n-3) \times n},$$

选取

$$\begin{aligned}\mathcal{V}_1 &= \mathcal{V}_2 \cap \mathcal{V}_3, \quad \mathcal{V}_2 = \text{span}\{e_4, e_5, \dots, e_{n-1}\}, \\ \mathcal{V}_3 &= \text{span}\{e_3, e_4, \dots, e_{n-2}\}, \quad \mathcal{V}_4 = \mathcal{V}_2 + \mathcal{V}_3.\end{aligned}$$

同样可验证 $(\mathcal{V}_i, i \in \{1, 2, 3\})$ 是个 DSIS, 且 $\text{im}E \subset \mathcal{V}_1 \subset \mathcal{V}_4 \subset \ker D$. 于是根据文[1], 可以设计如下一阶分散化干扰解耦控制器:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{w}}_i(t) &= M_i \mathbf{y}_i(t) + N_i \mathbf{w}_i(t), \\ \mathbf{u}_i(t) &= K_i \mathbf{y}_i(t) + L_i \mathbf{w}_i(t), \quad i = 1, 2,\end{aligned}$$

其中

$$K_1 = [k_{11} \ k_{12} \ k_{13} \ 0 \cdots 0 \ k_{1,n-2}] \in R^{1 \times (n-2)}, \quad (2.5)$$

k_{11}, k_{12}, k_{13} 自由 $k_{1,n-2}$ 固定

$$K_2 = [0 \cdots 0 \ k_{2,n-4} \ k_{2,n-3}] \in R^{1 \times (n-3)}, \quad (2.6)$$

$k_{2,n-4}$ 固定 $k_{2,n-3}$ 自由

$$M_1 = [m_{11} \ m_{12} \ m_{13} \ m_{14} \ 0 \cdots 0 \ m_{1,n-2}] \in R^{1 \times (n-2)}, \quad (2.7)$$

m_{11}, m_{12}, m_{13} 自由 $m_{14}, m_{1,n-2}$ 固定

$$M_2 = [m_{21} \ 0 \cdots 0 \ m_{2,n-5} \ m_{2,n-4} \ m_{2,n-3}] \in R^{1 \times (n-3)}, \quad (2.8)$$

m_{21} 固定 $m_{2,n-5}, m_{2,n-4}$ 固定 $m_{2,n-3}$ 自由

$$L_1 = \frac{1}{\mu} b_{22} a_{n,n-1}, \quad L_2 = \frac{1}{\mu} b_{n1} a_{23}, \quad (2.9)$$

$$k_{13} = -\frac{1}{\mu} b_{n2} a_{23} - L_1, \quad k_{2,n-4} = -\frac{1}{\mu} b_{21} a_{n,n-1} - L_2,$$

$$N_1 = (b_{31} + b_{n-1,1})L_1 + (b_{32} + b_{n-1,2})(k_{2,n-4} + L_2) + a_{n-1,n-1}, \quad (2.10)$$

$$N_2 = a_{33} + (b_{31} + b_{n-1,1})(k_{13} + L_1) + (b_{32} + b_{n-1,2})L_2, \quad (2.11)$$

$$m_{13} = m_{2,n-4} = N_2 - N_1, \quad m_{14} = m_{21} = a_{34},$$

$$m_{1,n-2} = m_{2,n-5} = a_{n-1,n-2}.$$

3) 如果继续减少每个控制站上的量测输出, 但只要每个控制站所具有的量测输出包括 e_f , 即对应进料板上的液体组分 x_f , 总可以找到一个 DSIS($\mathcal{V}_i, i \in \{1, 2, 3\}$) 具有 $\text{im}E = \text{span}\{e_f\} \subset \mathcal{V}_1 \subset \mathcal{V}_4 \subset \ker D$. 于是由文[1]知, 总存在阶数不大于 $(\dim \mathcal{V}_4 - \dim \mathcal{V}_i, i = 2, 3)$ 的分散化控制器实现干扰解耦.

三、仿 真 结 果

笔者对由 9 块塔板, 1 个冷凝器和 1 个再沸器组成的二元蒸馏塔进行了仿真实验. 该蒸馏塔的参数矩阵为^[4]

$$A = \begin{bmatrix} -0.174 & 0.105 & & & & & & & & & & & & & & & & 0 \\ 0.522 & -0.943 & 0.469 & & & & & & & & & & & & & & & \\ & 0.522 & -0.991 & 0.529 & & & & & & & & & & & & & & \\ & & 0.522 & -1.051 & 0.596 & & & & & & & & & & & & & \\ & & & 0.522 & -1.118 & 0.596 & & & & & & & & & & & & \\ & & & & 0.522 & -1.584 & 0.718 & & & & & & & & & & & \\ & & & & & 0.922 & -1.640 & 0.799 & & & & & & & & & \\ & & & & & & 0.922 & -1.721 & 0.901 & & & & & & & & \\ & & & & & & & 0.922 & -1.823 & 1.021 & & & & & & & \\ & & & & & & & & 0.922 & -1.943 & 1.142 & & & & & & \\ & & & & & & & & & 0.115 & -0.171 & & & & & & \\ 0 & & & & & & & & & & & & & & & & & \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.00328 \\ 0.00384 \\ 0.00400 \\ 0.00376 \\ 0.00308 \\ 0.00236 \\ 0.00288 \\ 0.00308 \\ 0.00300 \\ 0.00032 \end{bmatrix}, \quad B_2 = -\begin{bmatrix} 0 \\ 0.00244 \\ 0.00288 \\ 0.00304 \\ 0.00280 \\ 0.00232 \\ 0.00312 \\ 0.00382 \\ 0.00412 \\ 0.00396 \\ 0.00042 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

3.1. 静态分散化反馈控制器参数确定

假定控制站不能获得的信息是 $\varphi_1 = \text{span}\{e_{11}\}$, $\varphi_2 = \text{span}\{e_1, e_2\}$, 根据式(2.2)–(2.4), 可选取反馈增益 K_i 分别为

$$K_1 = [0 \ 0 \ -330.0603 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 470.1743],$$

$$K_2 = [-251.4745 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 632.0375 \ 0].$$

3.2. 一阶动态分散化反馈控制器参数确定

假定控制站不能获得的信息结构是 $\varphi_1 = \text{span}\{e_{10}, e_{11}\}$, $\varphi_2 = \text{span}\{e_1, e_2, e_3\}$, 根据式(2.5)–(2.11)可以确定如下分散化补偿器结构:

$$K_1 = [0 \ 0 \ -800.2346 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

$$K_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 883.5121 \ 0],$$

$$M_1 = [0 \ 0 \ 1.5216 \ 0.5290 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.922 \ 0],$$

$$M_2 = [0.5290 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.9220 \ -1.5216 \ 0],$$

$$L_1 = 470.1743, \quad L_2 = -251.4745,$$

$$N_1 = -3.0501, \quad N_2 = -1.5285.$$

表 1 分别给出了系统矩阵 A 、静态分散化反馈后的系统矩阵 A_k 以及一阶动态分散化反馈后的系统矩阵 A_e 的特征值。比较可见, 经过静态或一阶动态分散化反馈, 系统的稳定性增强, 主极点比原系统具有更好的分布。仿真结果表明, 在单位阶跃干扰作用下, 反馈后的系统状态响应得到改善, 并且系统受控输出不再受进料组分干扰的影响。

表1 系统特征值

No.	$\lambda(A)$	$\lambda(A_k)$	$\lambda(A_e)$
1	-3.3294	-3.3549	-7.3361
2	-2.6839	-2.9771	-3.3549
3	-2.0218	-2.0427	-2.9771
4	-1.7409	-1.8173	-2.0427
5	-1.3320	-1.3213	-1.9561
6	-0.9419	-1.0087	-1.8173
7	-0.6095	$-0.8314 + 0.0588i$	-1.3213
8	-0.2838	$-0.8314 - 0.0588i$	$-0.8314 + 0.0588i$
9	-0.1485	-0.3305	$-0.8314 - 0.0588i$
10	-0.0486	-0.1710	-1.1842
11	-0.0188	-0.1083	-0.3305
12			-0.2123
13			-0.1141

参 考 文 献

- [1] 张红艺、文传源,分散化系统中的结构关联集及应用,自动化学报,16(1990),1,1—8.
- [2] Franks, R. G. E., Modeling and Simulation in Chemical Engineering, Wiley-interscience, 1972.
- [3] Holland, C. D., Fundamentals and Modeling of Separation Processes, Prentice-hall, 1975.
- [4] Takamatau, T. and Kawachi, K., A Geometric Approach to Multivariable Control System Design of a Distillation Column, *Automatica*, 15(1979), 387—402.
- [5] Changlai, Y. S. and Ward, T. J., Decoupling Control of a Distillation Column, *AICHE J.*, 18(1972), 225.

DECENTRALIZED CONTROL OF A DISTILLATION COLUMN

Zhang Hongyi

(Jiangxi University)

Wen Chuanyuan

(Beijing University of Aero. and Astro)

ABSTRACT

The design of a decentralized static and dynamic disturbance decoupling controllers for a binary distillation column, under different information structures, is considered in this paper. The design results imply that the effect of the disturbance is completely rejected from the outputs of product by the use of decentralized feedbacks.

Key words: Distillation column; decentralization; disturbance decoupling.