

化工大系统的稳定性*

刘永清

(华南工学院)

摘 要

本文是化工大系统稳定性的一个综述, 对高维化工大系统利用 Ляпунов 直接法和分解法研究了它的稳定性。

Ляпунов 稳定性理论, 它的产生、发展都与生产实际、工程技术问题紧密联系着。正如 Lassale 在评论中^[1]指出: “稳定性理论正吸引着全世界数学家的注意, 而且李雅普诺夫直接法现在得到了工程师们的广泛赞赏”。又说: “稳定性理论在美国正迅速地变成训练自动控制方面的工程师的一个标准部分”。近二十多年来, 稳定性理论在化学工程等方面也得到了广泛的应用。

例如对一个非理想的连续搅拌槽反应器(简记为CSTR), 一般采用具有回流的ⁿ个理想的CSTR串联的大系统来模拟它。为此, 首先介绍一个在非均相下不等温CSTR的稳定性。

对CSTR向槽中输入某种液体的流量为 F , 而该液体含有物质 A 的浓度为 C_i , 温度 T_i , 反应器流出的流量也为 F 。反应器中由 A 生成物质 B ($A \xrightarrow{R'} B$) 的浓度为 C , 温度 T , 槽内液体的体积为 V 。设槽内液体的浓度 C 和温度 T 是完全混合。槽内接一螺旋管, 冷流体的流量为 q , 入、出口温度为 T_c 及 T 。根据化工过程中物料平衡和能量平衡建立CSTR的数学模型为

$$\begin{cases} V \frac{dC}{dt} = F(C_i - C) - VR'(C, T), \\ V\rho C_p \frac{dT}{dt} = F\rho C_p(T_i - T) - UA(T - T_c) + (-\Delta H)VR'(C, T), \\ R'(C, T) = K_0 C^n \exp\left(-\frac{E'}{RT}\right). \end{cases} \quad (1)$$

*本文系中国科学院科学基金资助的课题。

本文于1986年3月11日收到, 1986年6月20日收到修改稿。

求 CSTR 的静态(奇点)是我们分析 CSTR 动态的基础,并且这是对化工大系统动态设计的前提条件。由于求静态的方程是超越方程,由于超越方程求零点的难度大、困难多,因此,求化工大系统的静态是目前在化工大系统中最活跃的研究课题。近几年已将分支理论这个新方法,引入求化工大系统的静态,在(1)中令 $\frac{dC}{dt} = 0$, $\frac{dT}{dt} = 0$, 得到一

组超越方程,在一般情况下静态 $\bar{C}$, $\bar{T}$ 没有解析的表达式。(1)中 $n=1$ 为一级反应时,可由图解法得到超越静态方程有一个、二个至最多有三个静态值,对这些超越方程求静态已在[2]~[7]中做了许多工作。另外,对反应器的设计和控制,预先知道静态(奇点)的多重性和唯一性是较重要的。在这方面早期有[8]、[9]、[10]的工作。限制 CSTR 在一级绝热反应的从 1964~1975 年有[11]~[14];非绝热的 1973~1978 年有[15]~[19];近期对 CSTR 一般 n 级放热反应 1977 年有[20],讨论 CSTR 的 n 级绝热的放热反应;1978~1979 年有[21]~[23]、[24]中 Lin 将这一问题推广到 CSTR 二元放热反应与自

催化反应静态的多重性和唯一性上来。即研究 $A + bB \xrightarrow{r_A} \text{产物}$, 1980 年[25]也考虑了这个问题,并给出了 CSTR 二元放热反应静态存在多重性的必要条件,及存在静态多重性的充分条件。[26]~[36]都分别研究了 CSTR 的稳定性。

类似于对一个 CSTR 的做法,可以建立 n 个 CSTR 串连的大系统的数学模型为

$$\begin{cases} \rho V C_p \frac{dT_i}{dt} = q \rho C_p (T_{i-1} - T_i) - hA(T_i - T_c) + \Delta H V R'_i(C_i, T_i), \\ V \frac{dC_i}{dt} = q(C_{i-1} - C_i) - V R'_i(C_i, T_i), \\ R'_i = K_0 C_i^m \exp\left(-\frac{E}{T_i}\right), i = 1, 2, \dots, n, m \geq 1 \text{ 正整数}. \end{cases} \quad (2)$$

1979 年 Masari, Stephanopoulos 和 Aris^[37], 就 $n=3, 16$ 在具体参数下求出了(2)的静态及其多重性的表达式,并以 16 个 CSTR 的串连来模拟具有轴向扩散绝热管式反应器的数学模型,并给出了 n 个($n=3, 16$)CSTR 串连反应器系统的稳定性分解。

在化学反应速率为一级($m=1$)的情况下,对(2)取新的参变量化为无量纲的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = \theta_i x_i + R_i y_i - U x_i - \frac{1}{\tau} (x_i - x_{i-1}), \\ \frac{dy_i}{dt} = -\theta_i x_i - R_i y_i - \frac{1}{\tau} (y_i - y_{i-1}), (i = 1, 2, \dots, n). \end{cases} \quad (3)$$

θ_i , R_i 是温度的非线性函数,故(3)是 $2n$ 个非线性方程组。[37]首先考虑了 $n=3$ 时的情况,设(3)的孤立子系统为

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = \left(\theta_i - U - \frac{1}{\tau} \right) x_i + R_i y_i, \\ \frac{dy_i}{dt} = -\theta_i x_i - \left(R_i + \frac{1}{\tau} \right) y_i, \quad (i=1,2,3). \end{cases} \quad (4)$$

取(4)的 V 函数为 $V = x_i^2 + y_i^2$, $(i=1,2,3)$. (3) 的互联项为

$$\sqrt{V_i} g_i = \frac{2}{\tau} (x_i x_{i-1} + y_i y_{i-1}).$$

对(3)得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i(3)} &\leq \left[-2 \min \left\{ \frac{1}{\tau} + U - \theta_i, R_i + \frac{1}{\tau} \right\} + \max \left\{ |R_i - \theta_i| \right\} \right] V_i + \frac{1}{\tau} (V_i - V_{i-1}) \\ &\leq \left(-\mu_i + \frac{1}{\tau} \right) V_i + \frac{1}{\tau} V_{i-1}, \quad (i=1,2,3) \end{aligned} \quad (5)$$

限制温度在一定范围内, 得到(5)的辅助系统

$$\dot{V}_{(3)} \leq AV = \begin{bmatrix} -\mu_1 + \frac{1}{\tau} & 0 & 0 \\ \frac{1}{\tau} & -\mu_2 + \frac{1}{\tau} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\tau} & -\mu_3 + \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

这样满足了[38]中定理的条件, 得到大系统(3)的静态是渐近稳定的. 这种做法对一般 n 也是成立的.

文[37]中并与 Berger 和 Lapidus^[36] 构造的 Красовский 的 Ляпунов 函数 $V = f^T f$ 研究的 n 个 CSTR 串连的大系统的稳定性进行了比较. 并用 16 个 CSTR 串连来模拟轴向扩散绝热的管式反应器系统的稳定性.

若将 CSTR 中的螺旋管改为围绕反应器侧面的圆柱形夹套, 当 CSTR 中温度较高时, 有时将夹套中的冷流体视为分割成完全混合的 n 块, 数学模型更接近于实际, 1983 年在刘永清、张泽绵指导下, 陈潮填^[39] 研究了带夹套的 CSTR 大系统:

$$\left\{ \begin{aligned} V \frac{dC}{dt} &= (C_i - C) - VR'(C, T), \\ \rho V C_p \frac{dT}{dt} &= F \rho C_p (T_i - T) - \sum_{k=1}^n \frac{1}{n} U A_H (T - T_{Jk}) + (-\Delta H) VR'(C, T), \\ \frac{1}{n} \rho_f V_f C_f \frac{dT_{Ji}}{dt} &= F_f \rho_f C_f (T_{Ji-1} - T_{Ji}) + \frac{1}{n} A_H (T - T_{Ji}), \\ R'(C, T) &= K_0 C^m \exp\left(-\frac{E'}{RT}\right), \quad (i=1, 2, \dots, n). \end{aligned} \right. \quad (7)$$

文中首先求出了 $n+2$ 个超越方程的静态 (奇点), 进而取新的变换将 (7) 平移到静态上去无量纲化, 然后将 $n+2$ 维大系统化为两个互联子系统的组合形式, 由对两个孤立子系统建立了它的 Ляпунов 函数, 从而由两个孤立子系统给出了 $n+2$ 维线性及非线性大系统的稳定性。

1984 年刘永清提出了 n 个带夹套的 CSTR 串连大系统的数学模型:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho V C_p \frac{dT_i}{dt} &= q \rho C_p (T_{i-1} - T_i) - hA(T_i - T_{Ji}) + \Delta H V R'_i(C_i, T_i), \\ V \frac{dC_i}{dt} &= q(C_{i-1} - C_i) - VR'_i(C_i, T_i), \\ \rho_f V_f C_f \frac{dT_{Ji}}{dt} &= \rho_f q_f C_f (T_c - T_{Ji}) + hA(T_i - T_{Ji}), \\ R'_i(C_i, T_i) &= K_0 C_i^m \exp\left(-\frac{E'}{RT_i}\right), \quad (i=1, 2, \dots, n). \end{aligned} \right. \quad (8)$$

在刘永清、张泽绵的指导下, 蔡广基^[40]对一级反应 ($m=1$) 求出了 $3n$ 个超越方程组的静态 (奇点)。取新的变换进行无量纲化并将 (8) 平移到静态 (奇点) 上去得到了带夹套的 n 个 CSTR 串连的 $3n$ 个非线性大系统:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = A_i \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} + B_i \begin{pmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_i(x_i, y_i) \\ -F_i(x_i, y_i) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (9)$$

$$F_i(x_i, y_i) = K_0 (y_{i0} + y_i) e^{x_{i0} + x_i} - K_0 y_{i0} e^{-\frac{E}{x_{i0}}} - \theta_i x_i - R_i y_i, \quad (i=1, 2, \dots, n).$$

将 $3n$ 个大系统 (9) 化为 n 个子系统相关联的组合系统。由 n 个孤立子系统: $\dot{X}_i = A_i X_i$, $X_i = (x_i, y_i, z_i)^T$, ($i=1, 2, \dots, n$) 的渐近稳定性蕴含了 n 个 CSTR 串连的线性及非线性大系统的稳定性。

Turing 等^{[41]~[43]}利用催化动力学讨论了具有反应与扩散的开系统,是由两个初始产品 A 和 B 在四个催化 C 、 W 、 V 、 V' 引发下与两个中间产品 X 和 Y 化合,最后生成产品 D 和 E (或废品)。

利用催化动力学导出物质浓度向量的偏微分方程为

$$\frac{\partial C}{\partial t} \Delta \cdot J + N + R(C), \quad (10)$$

此处 $J = -D \nabla C$ 是扩散流量浓度向量; $N = H(C_s - C)$ 是交换流量浓度向量; $R(C)$ 是反应速率积的向量。

如果假定初始产品和最后生成产品为常量,而两个催化 W 和 V' 的浓度也为常量,在浓度向量 C_s 处对 N , J 线性化,并利用拉氏变换的特征函数来近似系统的结构,切断结构中的循环结构,得到向量常微分方程:

$$\frac{dy}{dt} = (K - k^2 D)y, \quad (11)$$

此处, $y = [y_X \ y_C \ y_Y \ y_V]^T$, 而矩阵 $K - k^2 D$ 为

$$[K - k^2 D] = \begin{bmatrix} -k_2 x_0 - k^2 D_x & k_3 & -k_2 & 0 \\ k_2 Y_0 & -(k_3 + k_4 + k_5 B_0 + k^2 D_c) & k_2 V_0 & 0 \\ -k_2 Y_0 & k_3 & -(k_7 + k_2 x_0 + k_8 V_0 + k^2 D_Y) & -k_8 Y_0 \\ 0 & 0 & -k_3 V_0 & -k_3 Y_0 - k^2 D_V \end{bmatrix} \quad (12)$$

1976 年 Stephanopoulos 和 Schuelke^[44]研究了 Turing 等提出的具有反应与扩散的开系统 (10) 及简化为 (11) 的系统的稳定性分解。将系统 (11) 分解成有关联的两个子系统:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y_X \\ y_C \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -k_2 x_0 - k^2 D_x & k_3 \\ k_2 x_0 & -(k_3 + k_4 + k_5 B_0 + k^2 D_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_X \\ y_C \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -k_2 & 0 \\ k_2 x_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_Y \\ y_V \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} y_Y \\ y_V \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -(k_7 + k_2 x_0 + k_8 V_0 + k^2 D_Y) & -k_8 Y_0 \\ -k_8 V_0 & -k_8 Y_0 - k^2 D_V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_Y \\ y_V \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} -k_2 Y_0 & k_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_X \\ y_C \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

忽略 (13)、(14) 中相互关联项得到两个孤立子系统并建立两个孤立子系统的 V 函数 $V_1(y_X, y_C)$, $V_2(y_Y, y_V)$ 。由 V_1 、 V_2 沿关联子系统 (13)、(14) 的轨线对 t 求导数, 得到二维比较辅助系统。由 Красовский^[45] 的定理, 当两个孤立子系统分别为渐近稳定

的, 或一个稳定, 另一个子系统不稳定时, 分别推出互关组合系统(11)为渐近稳定的。

对一个非理想的聚合反应器或一个非理想的 CSTR, 一般采用具有回流的理想的 n 个 CSTR 串连来模拟它。又因为采用不同的引发剂或催化剂来获得游离基(活性聚合物的单体), 其数学模型又有不同的形式。

如引用游离基聚合动力学原理与物料平衡、能量平衡原理, 可将非理想的均聚合反应器, 以具有回流的两个 CSTR 串连模拟的数学模型为

$$\left\{ \begin{aligned} V_1 \frac{dM_1}{dt} &= q_0 M_1 + q' M_2 - (q_0 + q') M_1 - V_1 K_f M_1 \lambda_1^{(0)}, \\ V_2 \frac{dM_2}{dt} &= (q_0 + q') M_1 - (q_0 + q') M_2 - V_2 K_p M_2 \lambda_2^{(0)}, \\ V_1 \frac{d\eta_1}{dt} &= q_0 \eta_1 + q' \eta_2 - (q_0 + q') \eta_1 + V_1 K_p M_1 \lambda_1^{(0)} + \Phi V_1 K_t \{\lambda_1^{(0)}\}^2, \\ V_2 \frac{d\eta_2}{dt} &= (q_0 + q') \eta_1 - (q_0 + q') \eta_2 + V_2 K_p M_2 \lambda_2^{(0)} + \Phi V_2 K_t \{\lambda_2^{(0)}\}^2, \\ V_1 \frac{d\lambda_1^{(0)}}{dt} &= q_0 \lambda_1^{(0)} + q' \lambda_2^{(0)} - (q_0 + q') \lambda_1^{(0)} + V_1 \{2K_d I_1 - K_t [\lambda_1^{(0)}]^2\}, \\ V_2 \frac{d\lambda_2^{(0)}}{dt} &= (q_0 + q') \lambda_1^{(0)} - (q_0 + q') \lambda_2^{(0)} + V_2 \{2K_d I_2 - K_t [\lambda_2^{(0)}]^2\}. \end{aligned} \right. \quad (15)$$

1973 年 Shastry 和 Fan^[46]在取了两组数据及 9 种回流参数, 分别计算了(15)有一个及三个静态的具体数值。

Berger 和 Lapidus^[39]将求非理想均聚合反应器系统(15)静态由 Красовский V 函数所确定的稳定域的问题, 用惩罚函数法化为求非线性函数的最优化问题。他们取了三个不同的目标函数:

$$F = -V + \frac{1}{2} C(V - K)^2, \quad (16)$$

$$F = ABS(V) + \frac{1}{2} C(V - K)^2, \quad (17)$$

$$F = V^2 + \frac{1}{2} C(V - K)^2. \quad (18)$$

由这三个目标函数求极小值, 从而确定了(15)的 $V = K$ 的稳定域。

1973 年 Shastry 和 Fan^[46]对[36]中这三个目标函数研究并比较了方程(15)的

稳定域。今列表如下:

表 1 对不同目标函数 $V=K$ 的比较

回流 参数	方 程 (16)		方 程 (17)		方 程 (18)	
	K	Obj. Func.	K	Obj. Func.	K	Obj. Func.
0	0.006579	6.4×10^{-8}	0.006500	2.4×10^{-8}	0.006524	1.6×10^{-12}
2	0.006834	1.33×10^{-10}	0.006824	9.68×10^{-9}	0.006793	3.62×10^{-14}
4	0.007087	9.32×10^{-11}	0.007120	5.92×10^{-11}	0.007013	8.13×10^{-14}
6	0.007232	8.62×10^{-11}	0.007296	6.04×10^{-11}	0.007230	4.16×10^{-13}

1976 年 Stephanopoulos 和 Schuelke^[44] 也考虑了具有回流的两个 CSTR 串连来模拟非理想均聚合反应器系统的稳定性分解问题。对数学模型 (15) 分解为三个 2 阶的变量分别为: $[M_1, M_2; \eta_1, \eta_2; \lambda_1^{(0)}, \lambda_2^{(0)}]$ 的线性子系统, 由这三个无关的孤立线性子系统较易做出 Ляпунов 函数及其比较辅助线性系统满足 [45] 中定理的条件, 从而得到整体组合系统 (15) 静态的渐近稳定性及其稳定域。值得注意的是, 这里求得的稳定域要比 Berger 和 Lapidues^[38] 用非线性最优化求得的稳定域要大。

Berger 和 Lapidues 用非线性最优化方法得到的稳定域和 Stephanopoulos 与 Schuelke 用向量 Ляпунов 函数分解法得到稳定域的比较 ($V=K$) 如下 (表 2):

表 2

回 流 参 数	Berger 和 Lapidues 优化法 得到的 K 值 ($V=K$)	由 Stephanopoulos 和 Schuelke Ляпунов 分解得到的 K 值 ($V=K$)
0	0.006579	0.091320
2	0.006834	0.093051
4	0.007087	0.10064
6	0.007232	0.10292

1984 年在刘永清指导下, 林复华^[47] 利用 Барбашин 的 Ляпунов 函数公式, 把 (15) 分解为三个互联子系统, 由其孤立子系统的渐近稳定性导出了具有回流的两个 CSTR 串连系统 (15) 的渐近稳定性。

均聚合是同一物质的单体在引发剂下生成活性聚合物进行链增长的聚合; 而共聚合为多于两个化学物质的单体在催化剂的引发下, 生成不同的活性聚合物单体而进行链增长的聚合。在这些方面已有较多的论文研究了共聚合反应器的数学模型及对它的模拟。利用催化剂引发反应及应用共聚合反应动力学原理可建立共聚合反应单体 A 与 B 的消耗速率动力学模型为

$$\begin{cases} -\frac{dA}{dt} = \frac{I^{\frac{1}{2}}}{f(A,B)} [r_A A^2 + AB], \\ -\frac{dB}{dt} = \frac{I^{\frac{1}{2}}}{f(A,B)} [r_B B^2 + AB], \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} f(A,B) = (r_A^2 \delta_A^2 A^2 + 2\phi r_A r_B \delta_A \delta_B AB + r_B^2 \delta_B^2 B^2)^{\frac{1}{2}}, \delta_A = K_{1aa}^{\frac{1}{2}}/K_{paa}, \\ \delta_B = K_{1bb}^{\frac{1}{2}}/K_{pbb}, \phi = K_{1bb}/(K_{1aa}K_{1bb})^{\frac{1}{2}}, r_A = K_{paa}/K_{pab}, r_B = K_{pbb}/K_{pba}. \end{cases} \quad (20)$$

[46]在给出了两组参数值下,算出了共聚合反应器的静态值,并在一个或三个静态值下研究了温度与单体A, B; 单体A, B; 浓度与温度不同坐标的动态的范围分布图形及单体A, B的Ляпунов稳定域。并用上面(19)这一组动力学方程来模拟共聚合CSTR和注塞流共聚合反应器(PER)。

[48]中对轴向混合与循环的非绝热反应器(NATRAMAR)及ATRAMAR给出了它的静态及数学模型。[49]~[55]中分别研究了均聚合、共聚合在等温或不等温,半级引发与复杂引发下不同聚合反应器系统的稳定性。而[56]~[59]研究了固定床反应器的稳定性; [60]、[61]研究了管式反应器的稳定性和操作的不稳定性; [62]、[63]等研究了催化颗粒带有扩散的内反应的稳定性。1982年Burka^[64]对1974年Farrow和Edelson^[65]提出的大型多组分反应等问题由Stiff常微分方程描述的数学模型的分解问题。

向量Ляпунов函数法已扩展到分布参数系统的偏微分方程在稳定性理论中的分解问题中去。1971年Mcgowin和Perlmutter^[66]及1974年Liou, Lim和Wligand^[67]用向量Ляпунов函数与比较原理研究了具有轴合混合和循环的非绝热的管式反应器在稳定性理论中的分解问题。1972年Varma^[68]及1976年Stephanopoulos和Schuelke^[69]等人也研究了这个问题。

总结以上看来,分支理论将是今后研究化工大系统静态的一个主要方法。如何根据化工大系统的物理结构提出合理的分解,从而减少保守性,将是化工大系统稳定性研究的一个重要方面。特别值得提出的是,用Ляпунов方法研究分布参数系统的稳定性是今后注意的一个重要课题。另外,研究中配合计算机仿真,也是今后需要加强的一个薄弱环节。

参 考 文 献

- [1] Lasalle, J. P., SIAM Review, 1, (1964), 1-11.
- [2] Kermode, R. I. and W. F. Stevens, Can. J. Chem. Eng., 43, 68, (1965).
- [3] Nakashis, F., Kagaku, Kagaku, 2, 96, (1964).

- [4] Veztasa, S. A. and R. A. Schmitz, *AIChEJ*, 16, (1970), 337.
- [5] Furusawa, T., H. Niokimura and T. Miyauchi, *J. Chem. Eng. Tapan* 2, (1969), 95.
- [6] Wheeler, J. M. and R. Aris, *Chem. Eng. Sci.*, 25, (1970), 445.
- [7] Buccaro, G. P., N. Y. Cattonde and J. M. Douglas, *AIChEJ*, 16, (1970), 249.
- [8] Heerden, C. V., *Ind. Eng. Chem.*, 45, (1953), 1242.
- [9] Heerden, C. V., *Chem. Eng. Sci.*, 8, (1958), 133.
- [10] Bilous, O. and N. R. Amundson, *AIChEJ*, 1, (1955), 513.
- [11] Douglas, J. M., *Chem. Eng. Symp. Ser.*, 60, (1964), 1.
- [12] Regenass, W. and R. Aris, *Chem. Eng. Sci.*, 20, (1965), 60.
- [13] Aris, R., *Chem. Eng. Sci.*, 24, (1969), 149.
- [14] Luss, D. and G. T. Chen, *Chem. Eng. Sci.*, 30, (1975), 1483.
- [15] Varma, A. and N. R. Amundson, *Can. J. Chem. Eng.*, 51, (1973), 206.
- [16] Uppal, A., W. H. Ray and A. B. Poore, *Chem. Eng. Sci.*, 29, (1974), 967.
- [17] Uppal, A., W. H. Ray and A. B. Poore, *Chem. Eng. Sci.*, 31, (1976), 205.
- [18] Varma, A. and R. Aris, Chap. 2, J. E. Bailey, Wilhelm Memorial Volume On Chemical Reactor Theory, Chap. 12, Prentice Hall Englewood Chiffe, New Jersey, (1976).
- [19] Kauschus, W., J. Demont and K. Hartmann, *Chem. Eng. Sci.*, 33, (1978), 1283.
- [20] Bosch, B. V. D. and D. Luss, *Chem. Eng. Sci.*, 32, (1977), 203.
- [21] Tostisis, T. T. and R. A. Schmitz, *Chem. Eng. Sci.*, 34, (1979), 135.
- [22] Chang, H. C. and J. M. Calo, *Chem. Eng. Sci.*, 34, (1979), 285.
- [23] Lin, K. F. and T. S. Sun, Taipei, Taiwan 26 Nov. 1978; *J. Chem. Eng. Japan* in Press.
- [24] Lin, K. F., *Can. J. Chem. Eng.*, 57, (1979), 476.
- [25] Lin, K. F., *Chem. Eng. Sci.*, 35, (1980), 1537.
- [26] 刘永清编, 现代工程技术中的数学原理与方法, 卷2下册, 第五章第五节, 第六章第五节, 第七章第七节, 华南工学院研究生教材.
- [27] Aris, R., *Introduction to the Analysis of Chemical Reactors*, Prentice Hall Englewood Chiffe, N. J., (1967).
- [28] Bilous, D. and N. R. Amundson, *AIChEJ*, 1, (1955), 513.

- [29] Berger, J. S. and D. D. Perlmutter, *AIChEJ*, 10, (1964), 233-238; *Chem. Eng. Sci.*, 20, (1965), 147.
- [30] Leathrum, J. F., E. F. Johnson and L. Lapidus, *AIChEJ*, 10, (1964), 16.
- [31] Koepcke, R. and L. Lapidus, *Chem. Eng. Sci.*, 16, (1961), 252.
- [32] Luecke, R. H. and M. L. Meguire, *AIChEJ*, 11, (1965), 749; *1/FC Fundamentals*, 6, (1967), 435.
- [33] Paradis, w.o. and P. D. Perlmutter, *AIChEJ*, 12, (1966), 130.
- [34] Stevens, W. F. and L. A. Wanninger, JR. *Can. J. Chem. Eng.*, 44, (1966), 158.
- [35] Berger, A. J. and L. Lapidus, *AIChEJ*, 14 (1968), 358.
- [36] Berger, A. J. and L. Lapidus, *AIChEJ*, 15, (1969), 171.
- [37] Mareri, M. G. Stephanopoulos and R. Aris, *Chem. Eng. Sci.*, 34, (1979), 11-15.
- [38] Weissenferger, S. *Automatica*, 9, (1973).
- [39] 陈潮填, 带夹套的连续搅拌釜反应器的稳定性, *华南工学院学报*, 11, 4, (1983), 56-68.
- [40] 蔡广基, n 个带夹套的连续搅拌槽反应器的稳定性, *华南工学院学报*, 12, 3, (1984), 94-105.
- [41] Turing, A. M., *Phil. Trans. Roy. Soc., London*, B. 237, (1952), 37.
- [42] Prigogine, I. and G. Nicolis, *J. Chem., Physics*, 46, (1967), 2542.
- [43] Othmer, H. G. and L. E. Seriven, *Ind. Eng. Chem., Fundamentals* 8, (1967), 302.
- [44] Stephanopoulos, G. and L. M. Schuelke, *AIChEJ*, 22, (1976), 855-867.
- [45] Krasovskii, N. N., *Stability of Motion*, Stanford Univ. Press. Stanford Cal., (1963).
- [46] Shastri, J. S. and L. T. Fan, *Chem. Eng. J.*, 6, (1973), 129-143.
- [47] 林复华, 均聚合反应器系统的稳定性, 1984 年. (待发表)
- [48] Liou, C. T., J. C. Lim and W. A. Weigand, *Chem. Eng. Sci.*, 25, (1970), 445.
- [49] Matsuura, T. and M. Kato. *Chem. Eng. Sci.*, 14, (1970), 2683.
- [50] Knorr R. S. and K. F. Opricall, *J. Appl. Polym. Sci.*, 14, (1970), 2683.
- [51] Hoftyzer, P. J. and T. N. Rweitening, *Chem. Eng. Sci.*, 14, (1964), 241.

- [52] Warden, R. B., etc., Chem. Eng. Sci., 19, (1964), 173.
- [53] Goldstein, R. P. and N. R. Amundson, Chem. Eng. Sci., 20, (1965), 422; 447; 449; 501.
- [54] Minashi, S., T. Ayabe, T. Ono and N. Ito, Kagaku Kagaku, 31, (1971), 1225.
- [55] Chiu, M. H. etc., J. Ch. Inst. Chem. Eng., 2, (1971), 13.
- [56] McGuire, M. L. and L. Lapidus, AIChEJ, 11, (1965), 85.
- [57] Barkelew, C., Chem. Eng. Progr. Symposium Ser, 25, 55, (1959), 37.
- [58] Liu, S. and N. R. Amundson, Ind. Eng. Chem. Fundamentals, 2, (1963), 183.
- [59] Shen-Lin Liu and N. R. Amundson, Ind. Eng. Chem. Fundamentals, 1, 3, (1962) 200; 2~3, (1963). 13; 183.
- [60] Oroskar, A. and S. A. Stern, AIChEJ, 25, (1979), 903.
- [61] Rrilly, M. J. and R. A. Schmirz, AIChEJ, 12, (1966), 153.
- [62] Wei, J., Chem. Eng. Sci., 20, (1965), 729.
- [63] Jackson, R., Chem. Eng. Sci., 28, (1973), 1355.
- [64] Burka, M. K., AIChEJ, 28, (1982), 11-19.
- [65] Farrow L. A. etc., Int. J. Chem. Kinetics, 6, (1974), 787.
- [66] McGowin, C. R. and D. D. Perlmutter, AIChEJ, 17, (1971), 831.
- [67] Liou, C. T. etc., Chem. Eng. Sci., 29, (1974), 405.
- [68] Varma, A, Ph. D. Thesis. Univ. Minn. Minneapolis, (1972).

THE STABILITY OF CHEMICAL ENGINEERING LARGE—SCALE SYSTEMS

Liu Yongqing

(South China Institute of Technology, Guangzhou)

Abstract

This paper presents a summary for the stability of various chemical engineering large-scale systems. The stability problem of highly dimensional chemical engineering large-scale systems is studied through the use of Lyapunov's direct method and a decomposition method.