

结构分散模型及其应用

陈铁军

(郑州工学院计自系, 450002)

邱祖廉

(西安交通大学信控系, 710049)

摘要

本文用链系统的结构分散化模型描述受控系统的动态特性,该模型以子系统级模型给出,显含人工对系统因果分析的经验知识.文中引入了因果链、链结构和链能达性等概念,研究了有关性质,并讨论了一个实例.

关键词: 建模,结构分散化,链系统.

一、引言

建模是控制的基础,集中控制要求建立集中模型,分散控制允许局部控制器仅获取局部测量信息^[1],结构分散控制依赖于系统的结构特征^[2].但由于缺乏对一般多输入多输出关联系统建立结构分散模型的方法,所以结构分散控制的研究进展较慢.

受控系统的各测量变量以及它们之间的因果关系构成一个有主次之分的整体.主要的因果关系决定了系统的一种结构模式,可以用作系统结构分散化的依据.在保持系统整体结构特征的前提下,对受控系统进行结构分散化,可以建立以子系统模型给出的显含整体系统因果结构的结构分散模型.

二、因果关系分析

为了掌握多输入多输出系统 Σ 的运动行为,一般要测量其受控输出 y_1, y_2, \dots, y_{p_1} ;中间测量输出 $y_{p_1+1}, y_{p_1+2}, \dots, y_{p_1+p_2}$;和控制输入 u_1, u_2, \dots, u_{q_1} .统称为系统 Σ 的测量变量.这里 p_1, p_2 和 q_1 均为有限正整数.设这些测量变量都是时间 $t \in T$ 的实值函数, T 是离散时间集.系统 Σ 的数学描述可抽象为^[3]

$$\Sigma = \{Z^n, F, Z_0^n, B(Z^n)\}, \quad (1)$$

其中 Z^n 是测量变量的状态集, $n = p_1 + p_2 + q_1$,设其为定义于 T 上的 n 维实向量函数空间. $F \subset Z^n \times Z^n$ 是Cartesian积 $Z^n \times Z^n$ 上的一个关系. $Z_0^n \subset Z^n$ 是初始测量集, $B(Z^n) \subset Z^n$ 是许可集.

显然该系统的单输出模型 Σ_i 可抽象为

$$\Sigma_i = \{Z, Z^{n_i}, F'_i, Z_0^{n_i}, B(Z^{n_i})\}, \quad (2)$$

式中 $F'_i \subset Z^{n_i} \times Z$ 是单输出因果关系, $n_i \leq n$. 称 $\langle w'_i, y_i \rangle \in F'_i$ 为单输出因果对, y_i 是果变量, $w'_i \in Z^{n_i}$ 是因变向量. 进一步分析可以发现 w'_i 的各分量对 y_i 的作用是有区别的, 有些对 y_i 起控制作用, 有些可看作扰动作用. 设 w''_i 表示 w'_i 中对 y_i 起控制作用的分量组成的向量, 则 Σ_i 可进一步表示为

$$\Sigma_i = \{Z, Z^{r_i}, F''_i(Z^{n_i-r_i}), Z_0^{n_i}, B(Z^{n_i})\}, \quad (3)$$

其中 $r_i \leq n_i$, 是 w''_i 的维数. $F''_i(Z^{n_i-r_i}) \subset Z^{r_i} \times Z$ 为单输出控制因果关系, 以集合 $Z^{n_i-r_i}$ 为参集. 称 $\langle w''_i, y_i \rangle \in F''_i(Z^{n_i-r_i})$ 为单输出控制因果对.

根据对受控系统因果分析的经验知识, 予以适当分工, 可以为每一个子系统指定唯一的(间接)控制输入 w_i , 则相应的抽象模型为

$$\Sigma_i = \{Z, F_i(Z^{n_i-1}), Z_0^{n_i}, B(Z^{n_i})\}, \quad (4)$$

式中 $F_i(Z^{n_i-1}) \subset Z \times Z$ 称为 Σ_i 的一个基本输入输出关系, 以 Z^{n_i-1} 为参集, $\langle w_i, y_i \rangle \in F_i(Z^{n_i-1})$ 为一个基本输入输出对.

三、因果链、链结构和链系统

设 S 表示系统 Σ 的基本输入输出对集

$$S = \{\langle w_i, y_i \rangle \mid \langle w_i, y_i \rangle \in F_i(Z^{n_i-1}), i = 1, 2, \dots, p_1 + p_2\}. \quad (5)$$

显然对于任意的 $\langle w_i, y_i \rangle, \langle w_j, y_j \rangle \in S$, 若 $i \neq j$, 则总有 $y_i \neq y_j$, 但可能有 $w_i = w_j$.

Σ 的一条因果链 L_i 定义为 S 的一个子集

$$L_i = \{\langle z_{ij-1}, z_{ij} \rangle \mid \langle z_{ij-1}, z_{ij} \rangle \in S, j = 1, 2, \dots, k_i, ik_i \in \{1, 2, \dots, p_1\}\}, \quad (6)$$

其中 $k_i \geq 1$ 是定常正整数, 称为 L_i 的长度. z_{i0} 和 z_{ik_i} 分别称为 L_i 的链首和链尾.

令 L^* 表示 Σ 的因果链集合

$$L^* = \{L_i \mid L_i \subset S, i = 1, 2, \dots, p_1\}. \quad (7)$$

如果存在 $\langle z_{hm-1}, z_{hm} \rangle \in S \mid L_i$, 使 $L'_i = \{\langle z_{hm-1}, z_{hm} \rangle, L_i\} \in L^*$, 则称 L_i 是可延伸的; 否则称为是不可延伸的. 设

$$L = \{L_i \mid L_i \in S, \text{且 } L_i \text{ 不可延伸}, i = 1, 2, \dots, p_1\}, \quad (8)$$

如果为系统 Σ 确定了一个由(8)式给出的 L , 则称 L 为由 Σ 抽取的一个因果链结构. 称 (Σ, L) 为系统 Σ 的一个因果链形模型, 简称为 Σ 的一个链系统. 其子系统 Σ_{ij} 的一种具体表示为

$$z_{ij}(t+1) = F_{ij}(X_{ij}(t))z_{ij-1}(t - d_{ij-1}^{ij}), \quad (9)$$

其中 $z_{ij} \in Z$, 变量串 $X_{ij}(t) = \{z_{hm}(t - d_{hm}^{ij} - l_{hm}^{ij}) \mid hm \in N_{ij}\}$, $N_{ij} \triangleq \{hm \mid 0 \leq d_{hm}^{ij} < \infty\}$; 当 $hm \neq ij - 1$ 时, $0 \leq l_{hm}^{ij} \leq n_{hm}^{ij}$; 当 $hm = ij - 1$ 时, $1 \leq l_{hm}^{ij} \leq n_{hm}^{ij}$, $m = 0, 1, \dots, k_h, h = 1, 2, \dots, p_1\}$. d_{hm}^{ij} 是 Σ_{ij} 中 $z_{hm}(t)$ 相对于 $z_{ij}(t)$ 的时间滞后. 对于线性系统, n_{hm}^{ij} 可理解为阶次. $F_{ij}(X_{ij}(t)): Z \rightarrow Z$ 是以 $X_{ij}(t)$ 为参量的因果映射.

$$z_{ij}^m \leq z_{ij}(t) \leq z_{ij}^M, t \in T, \quad (10)$$

其中 $z_{ij}^m, z_{ij}^M \in B(Z^{n_i})$, $j = 1, 2, \dots, K_i$, $i = 1, 2, \dots, p_1$. 显然这是一个以子系统给出

的,含时间滞后、约束和因果结构的结构分散模型.

四、链能达性

考虑 Σ 的一个因果链结构 L , 若它满足

- 1) 对任意 $L_i, L_j \in L, i \neq j$, 都有 $L_i \cap L_j = \phi$;
- 2) 对任何 $L_i \in L$, 都有 $z_{i0} \neq z_{ij}, j = 1, 2, \dots, k_i, i = 1, 2, \dots, p_1$;
- 3) 对任何 $L_i, L_j \in L, i \neq j$, 都有 $z_{i0} \neq z_{j0}$; 则称它为一个简单链结构.

若它还满足

- 4) 对任何 $L_i \in L$, 都有 $z_{i0} \in \{u_1, u_2, \dots, u_{q_1}\}, i = 1, 2, \dots, p_1$;

则称它为一个完整的简单链结构.

若一个链系统 (Σ, L) 的因果链结构 L 是一个完整的简单链结构, 则称该系统是链能达的, 否则是链不能达的.

设系统 Σ 的控制因果关联矩阵 $R = \{r_{ij}\}$, 则

$$V = [y_{p_1+1}, \dots, y_{p_1+p_2} | u_1, \dots, u_{q_1}]' \triangleq [v_1, v_2, \dots, v_{p_2+q_1}]'$$

通过 R 对 $Y = [y_1, \dots, y_{p_1} | y_{p_1+1}, \dots, y_{p_1+p_2}]'$ 起控制作用. 即当 v_j 是 y_i 的控制因变量时, $r_{ij} = 1$, 否则 $r_{ij} = 0$. 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 R 分块成为

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

设“ \vee ”和“ \wedge ”分别表示布尔矩阵的逻辑和与逻辑乘, R_{21}^{iA} 表示 i 个布尔方阵 R_{21} 的逻辑乘, $R_{21}^{0A} \triangleq I$, I 是单位阵.

引理. 设 $R_1 = \{r_{ij}\}$ 是 n 维布尔方阵, 则对任意的 $k > n - 1$, 都有

$$\bigvee_{l=0}^k R_1^{lA} = \bigvee_{l=0}^{n-1} R_1^{lA}. \quad (12)$$

证明见附录.

该引理指出, 对任意的 $k > n - 1$, (12) 式的左边不能比其右边提供更多的信息.

设 $p_1 = q_1$, 令

$$R_{12}(k) = \begin{cases} R_{12}, & \text{当 } k = -1, \\ R_{12} \vee \left[R_{11} \wedge \left(\bigvee_{i=0}^k R_{21}^{iA} \right) \wedge R_{22} \right], & \text{当 } k \geq 0, \end{cases} \quad (13)$$

$$A(P, k) = P \wedge R_{12}(k), \quad (14)$$

式中 P 是适当维数的行交换矩阵.

设 $a_{ii}(k)$ 表示 $A(P, k)$ 的对角元素. 令

$$\theta_i(-1) = \{(12, h_i) | r_{h_i m_i}^{12} = 1\}, \quad (15)$$

$$\theta_i(k) = \{(22, S_{k+1}), (21, S_k), \dots, (21, S_1) | r_{h_i S_1}^{11} \wedge r_{s_1 s_2}^{21} \wedge \dots$$

$$\wedge r_{s_k s_{k+1}}^{21} \wedge r_{s_{k+1} s_k}^{22} = 1, s_1 \neq s_2 \neq \dots$$

$$\neq s_k, s_j \in \{1, 2, \dots, p_2\}, j = \{1, 2, \dots, k\}, k \geq 0, \quad (16)$$

$$\Theta(K) = \{\theta_i(j_i) \approx \phi \mid j_i \in \{-1, 0, \dots, k\}, i = 1, 2, \dots, p_1, \theta_l(j_l) \wedge \theta_h(j_h) = \phi, l \approx h, l, h = 1, 2, \dots, p_1\}. \tag{17}$$

定理 1. 设 $p_1 = q_1$, 则系统 Σ 存在一个链能达的链系统的充分必要条件是, 对某 $k \in \{-1, 0, \dots, p_2 - 1\}$, 存在 p_1 维行交换矩阵 P , 使

$$\Theta(k) \approx \phi. \tag{18}$$

证明. 设当 $k = -1$ 时, 存在 P 使(18)式成立, 显然可选因果链 $L_{h_i} = \{\langle u_{m_i}, y_{h_i} \rangle\}$, $h_i \in \{1, 2, \dots, p_1\}$. 因为在 $p_1 = q_1$ 时, $a_{ii}(-1)$ 是 $P \cap R_{12}$ 的对角元素, 所以 L_{h_i} 是完整的简单因果链. 当 $k = 0$ 时, 若定理中的条件成立, 则可选因果链 $L_{h_i} = \{\langle u_{m_i}, y_{h_i} \rangle\}$, 或 $L_{h_i} = \{\langle u_{m_i}, y_{c_1} \rangle, \langle y_{c_1}, y_{h_i} \rangle\}$, $h_i \in \{1, 2, \dots, p_1\}$, $c_1 \in \{p_1 + 1, \dots, p_1 + p_2\}$, $c_1 = s_1 + p_1$. 根据(17)式确定了一个链能达的链系统. 若(18)式不成立, 可重复进行前述步骤, 直到 $k = p_2 - 1$. 根据引理, 当 $k \geq p_2$ 时仍将得到同样的结论.

现在假设 Σ 存在一个链能达的链系统, 但对任何 $k \in \{-1, 0, \dots, p_2 - 1\}$, 都不存在使(18)式成立的 P , 这意味着对于某受控输出 y_i , 始终找不到一个独立的控制输入与之对应. 这与链能达的定义相矛盾. 证毕.

当 $q_1 < p_1$ 时, Σ 显然不存在链能达的链系统. 当 $q_1 > p_1$ 时, 令

$$A(P, Q, k) = P \wedge R_{12}(k) \wedge Q, \tag{19}$$

式中 Q 是适当维数的列交换矩阵, 用 $a_{ii}(k)$ 表示 $A(P, Q, k)$ 的前 p_1 列块阵的对角元素, $\theta_i(k)$ 和 $\Theta(k)$ 仍如(15)–(17)式定义, 则有

定理 2. 设 $q_1 > p_1$, 则系统 Σ 存在一个链能达的链系统的充分必要条件是, 对于某 $k \in \{-1, 0, \dots, p_2 - 1\}$, 存在适当维数的行和列交换阵 P 和 Q , 使

$$\Theta(k) \approx \phi. \tag{20}$$

证明(类似于定理 1) 略.

链能达性是一个能控系统的必要条件, 应在控制系统设计前确定. 根据受控系统的链能达性质, 可以提出系统的改造方案.

五、中变系统的结构分散模型

中变系统是化肥厂合成氨生产过程中的一个工段, 其工艺流程图如图 1 所示. 图中

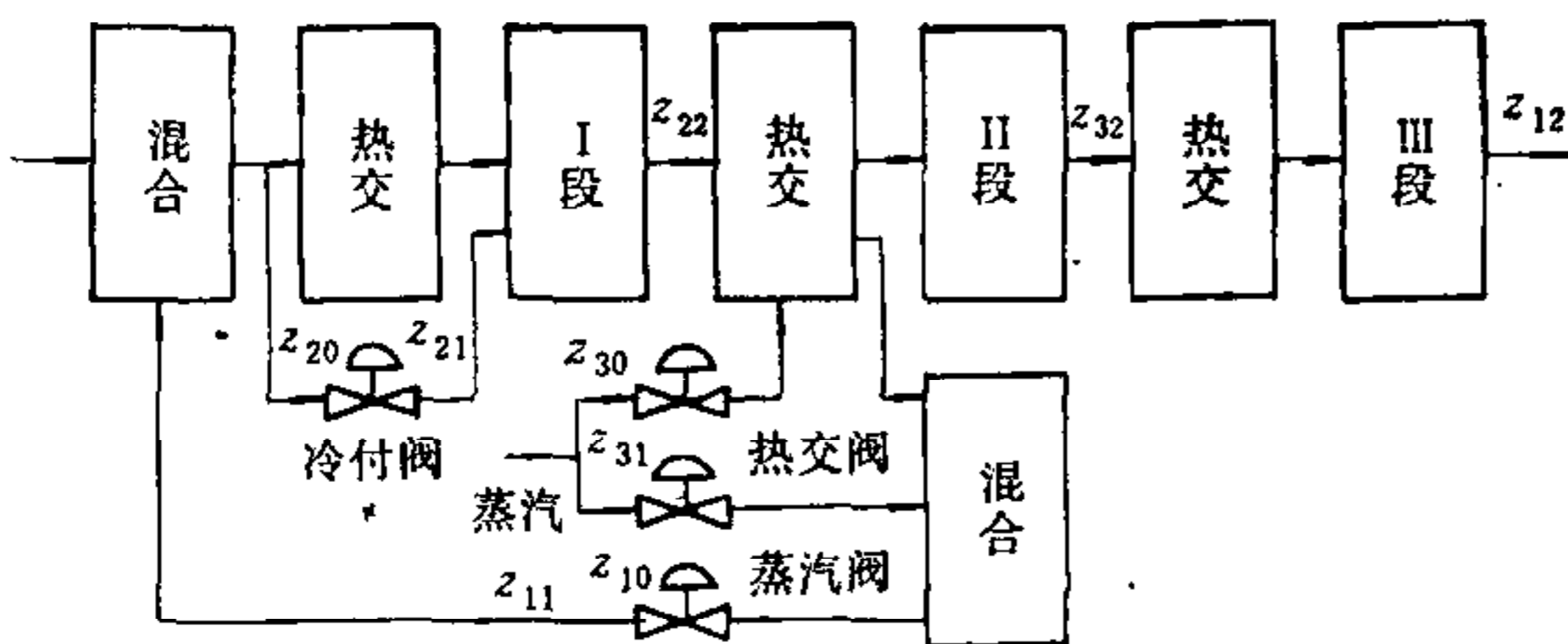


图 1 中变系统流程图

z_{12} 为变换气一氧化碳含量, z_{11} 为蒸汽流量, z_{10} 为蒸汽阀门开度, z_{22} 为 I 段热点温度, z_{21} 为 I 段敏点温度, z_{20} 为冷付线阀门开度, z_{32} 为 II 段热点温度, z_{31} 为 II 段敏点温度, z_{30} 为换热阀开度. 这些都是测量变量, 其中 z_{i2} 是受控输出, z_{i1} 是测量输出, z_{i0} 是控制输入, $i = 1, 2, 3$. 在 I、II 和 III 段触媒

层内一氧化碳气和水蒸汽发生如下化学反应:



所以一氧化碳链 L_1 为

$$L_1 = \{\langle z_{10}, z_{11} \rangle, \langle z_{11}, z_{12} \rangle\}. \tag{22}$$

冷付线阀门可调节进入 I 段气体的温度。而蒸汽在流量较小时，可通过(21)式影响 I 段温度；在流量较大时，又可带走温度。因此，I 段温度链有两种选择

$$L_2 = \{\langle z_{20}, z_{21} \rangle, \langle z_{21}, z_{22} \rangle\}, \tag{23}$$

$$L'_2 = \{\langle z_{10}, z_{11} \rangle, \langle z_{11}, z_{21} \rangle, \langle z_{21}, z_{22} \rangle\}. \tag{24}$$

类似地，II 段温度链也有两种选择

$$L_3 = \{\langle z_{30}, z_{31} \rangle, \langle z_{31}, z_{32} \rangle\}, \tag{25}$$

$$L'_3 = \{\langle z_{10}, z_{11} \rangle, \langle z_{11}, z_{31} \rangle, \langle z_{31}, z_{32} \rangle\}. \tag{26}$$

这里取 $L = \{L_1, L_2, L_3\}$ 作为 Σ 的链结构。对应于(9)式的模型为

$$z_{11}(t+1) = \theta_{11}z_{10}(t) + v_{11}, \tag{27}$$

$$z_{12}(t+1) = \theta_{21}z_{11}(t - d_{11}^{12}) / (v_{12}v_{13}) + \theta_{22}z_{32}(t - d_{32}^{12}) + \theta_{23}z_{22}(t - d_{22}^{12}), \tag{28}$$

$$z_{21}(t+1) = \theta_{31}z_{21}(t) + \theta_{32}z_{32}(t - d_{32}^{21}) + \theta_{33}z_{20}(t - d_{20}^{21}), \tag{29}$$

$$z_{22}(t+1) = z_{22}(t) + \theta_{41}[z_{11}(t - d_{11}^{22}) + v_{12}][z_{21}(t - d_{21}^{22}) - z_{22}(t)] + \theta_{42}v_{13}, \tag{30}$$

$$z_{31}(t+1) = \theta_{51}z_{31}(t) + \theta_{52}z_{30}(t - d_{30}^{31}) + \theta_{53}z_{22}(t - d_{22}^{31}), \tag{31}$$

$$z_{32}(t+1) = z_{32}(t) + [\theta_{61}z_{11}(t - d_{11}^{32}) + \theta_{62}v_{12}][z_{31}(t - d_{31}^{32}) - z_{32}(t)] + \theta_{63}v_{13} \tag{32}$$

其中 v_{11} 是扰动量， v_{12} 是入炉半水煤气流量， v_{13} 是入炉气一氧化碳含量， θ_{hm} 是模型中的参数。该链系统的关联框图见图 2。

系统的控制关联矩阵为

$$R = \left[\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]. \tag{33}$$

按照(13)–(17)式，有

$$R_{12}(-1) = R_{12} = [0], \tag{34}$$

$$R_{12}(0) = R_{12} \vee [R_{11} \wedge R_{22}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{35}$$

$$\theta_1(0) = \{(22, 1) | r_{11}^{11} \wedge r_{11}^{12} = 1\}, \tag{36}$$

$$\theta_2(0) = \{(22, 2) | r_{22}^{11} \wedge r_{22}^{22} = 1\}, \tag{37}$$

$$\theta_3(0) = \{(22, 3) | r_{33}^{11} \wedge r_{33}^{22} = 1\}. \tag{38}$$

因此 $\Theta(0) \neq \phi$ ，即该系统存在一个链能达的链系统。不难验证 (Σ, L) 是链能达的。而若取 L'_2 或 L'_3 构成链结构，则得到的链系统就是链不能达的。

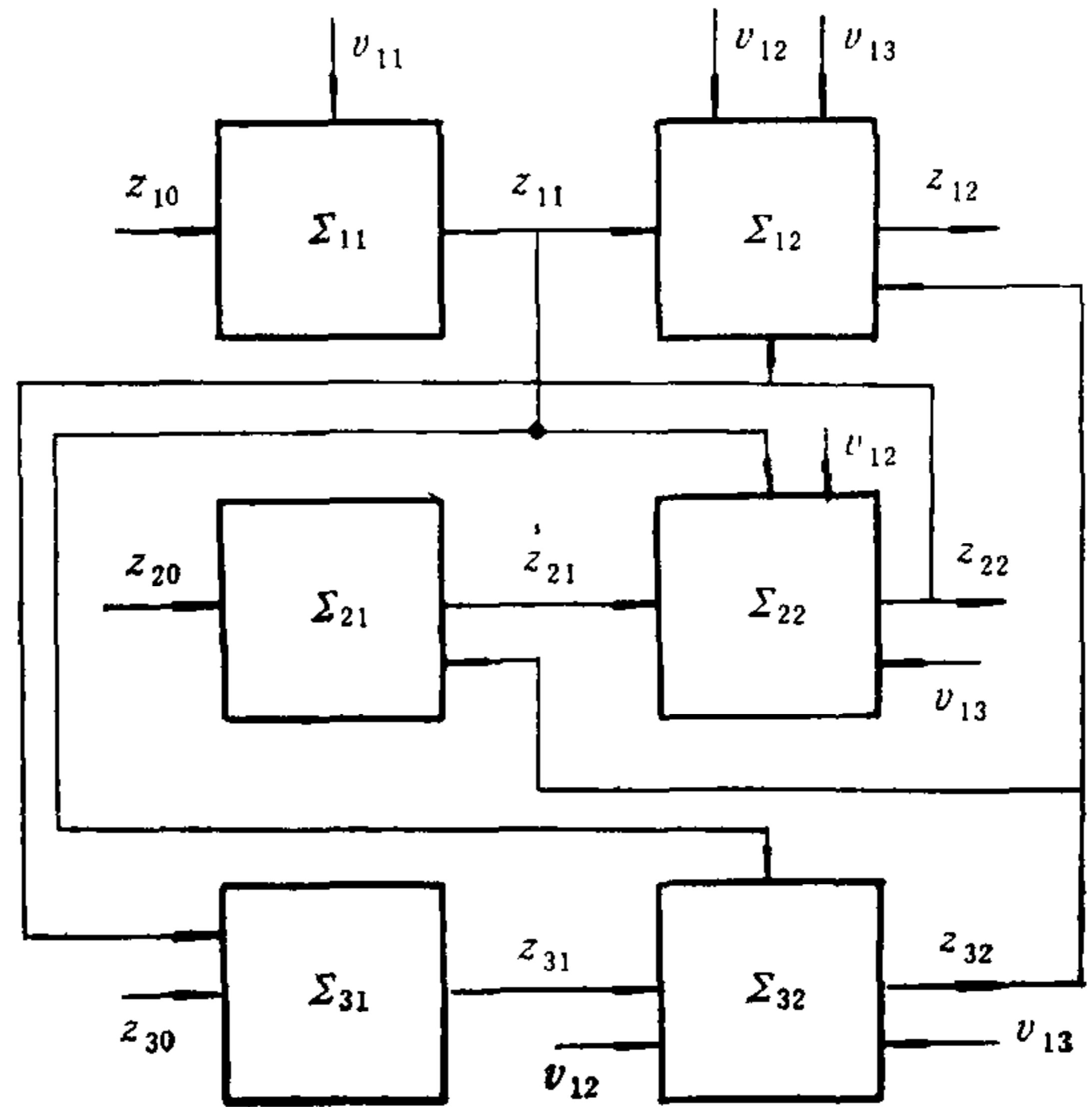


图 2 中变系统关联框图

六、结 束 语

结构分散模型(链系统)将定性的因果分析结果同传统的定量描述结合在一起,用按系统固有的因果结构相互关联的子系统描述该系统的运动行为。在因果结构(链结构)相对稳定的情况下,子系统可以是灵活多样的,可以是线性的或非线性的,含不同的时间滞后或采用互异的采样周样,允许引入各测量变量的约束或对其中的一部分提出特殊的要求;经过进一步发展,可以混合使用精确的和模糊的,语音的和符号的方法描述复杂系统运动的特性。结构分散模型可用于设计结构分散化预估算法^[4],和进行结构分散控制的研究。

附 录

引理的证明。

等式(12)两边的对角元显然分别相等,从而当 $n = 1$ 时的结论显而易见。现在证明当 $n \geq 2$ 时,(12)式两边非对角元亦都相等。令

$$\Gamma_s = r_{ik_1} \wedge r_{k_1 k_2} \wedge \dots \wedge r_{k_s j}, \quad (39)$$

(12)式右边的第 ij 个非对角元能表成

$$r_{ij} \vee \left[\bigvee_{s=1}^{n-2} \left(\bigvee_{k_1=1}^n \dots \bigvee_{k_s=1}^n \Gamma_s \right) \right],$$

所以只要证明对任 $i \neq j; i, j = 1, 2, \dots, n$, 和 $m > 0$, 有:

$$r_{ij} \vee \left[\bigvee_{s=1}^{n-2+m} \left(\bigvee_{k_1=1}^n \dots \bigvee_{k_s=1}^n \Gamma_s \right) \right] = r_{ij} \vee \left[\bigvee_{s=1}^{n-2} \left(\bigvee_{k_1=1}^n \dots \bigvee_{k_s=1}^n \Gamma_s \right) \right] \quad (40)$$

成立即可。

若 $r_{ij}, \Gamma_s, s = 1, 2, \dots, n-2$, 中有一项等于 1, 则上式成立。设

$$r_{ij} = 0, \Gamma_s = 0, s = 1, 2, \dots, n-2, \quad (41)$$

于是问题转化为在条件(41)下,证明

$$\Gamma_{n+m-2} = 0, m = 1, 2, \dots. \quad (42)$$

设 $m = 1$, 显然当 $k_l = i$, 或 $k_l = j, l \in \{1, 2, \dots, n-1\}$ 时有

$$\Gamma_{n-1} = (r_{ik_1} \wedge r_{k_1 k_2} \wedge \dots \wedge r_{k_{l-1} k_l}) \wedge (r_{k_l k_{l+1}} \wedge \dots \wedge r_{k_{n-1} j}) = 0. \quad (43)$$

设 $k_l = k_h, l \neq h$, 并把 Γ_{n-1} 重新表示为

$$\Gamma_{n-1} = [r_{ik_1} \wedge \dots \wedge r_{k_{l-1} k_l} \wedge r_{k_h k_{h+1}} \wedge \dots \wedge r_{k_{n-1} j}] \wedge r_{k_l k_{l+1}} \dots \wedge r_{k_{h-1} k_h}. \quad (44)$$

由(41)式,上式右边括号内为零,所以 $\Gamma_{n-1} = 0$ 。设 k_l 取值于 $\{1, 2, \dots, j-1, j+1, \dots, j-1, j+1, \dots, n\}, l \in \{1, 2, \dots, n-1\}$, 从 $n-2$ 个元素中取 $n-1$ 个作为一个组合,无论如何选取,总存在某 $l \neq h$, 使 $k_l = k_h$, 即总有 $\Gamma_{n-1} = 0$ 。

假设当 $m = 1, 2, \dots, g$, 时(42)式都成立,显然当 $k_l = i$, 或 $k_l = j$, 或 $k_h = k_l, l, h \in \{1, 2, \dots, n+g-1\}$ 时总有

$$\Gamma_{n+g-1} = 0. \quad (45)$$

证毕。

参 考 文 献

- [1] Wang S. H. and Davison, E. J., On the Stabilization of Decentralized Control System, *IEEE*

Trans. Aut. Contr., 18(1973),473—478.

[2] D. D. Šiljak, On Reachability of Dynamic Systems, *Int. J. Sys. Sci.*, 8(1977),321—338.

[3] Kalman, R. E. et al., *Topics in Mathematical System Theory*, New York, McGraw-Hill,(1969).

[4] 陈铁军、邱祖廉,链预估器及其应用,自动化学报, 18(1992),(3),290—296.

A STRUCTURALLY DECENTRALIZED MODEL AND ITS APPLICATION

CHEN TIEJUN

(Dept. of Computer and Automation Zhengzhou Institute of Technology, 450002)

QIU ZULIAN

(Dept. of Information and Control Xi'an Jiaotong University, 710049)

ABSTRACT

A structurally decentralized model termed as chains system is presented in this paper to describe the dynamic behaviour of the controlled system. It is given in subsystems, explicitly involving the cause and effect analysis knowledge. The concepts of the cause and effect chains, the chains structure and the chains reachability are introduced, and some of the properties are studied. Finally, its application to an industrial system is discussed.

Key words: Modelling; structural decentralization; chains system.



陈铁军 1989年毕业于西安交通大学信控系,获博士学位。现任郑州工学院计自系副教授。感兴趣的研究方向为,过程控制系统和复杂系统理论、自适应和智能控制及其在实际中的应用。提出链系统方法。



邱祖廉 1960年毕业于西安交通大学自控专业并留校任教,现为副教授。主要从事生产过程综合控制等方面的现代控制理论及其应用的研究,近年来,在合成氨、硫酸等行业综合计算机控制方面取得一些科研成果,发表论文多篇。