

# 逐次降维解耦方法

王 永 初

(精密机械工程系)

## 摘 要

本文提出一种逐次降维的解耦方法,可以对系统中的耦合支路逐次分离解耦.这种方法同 Rosenbrock 对角优势判断方法及 Sinskey 相对放大系数方法结合,可以使大系统的控制系统设计得到简化,具有比较广泛的应用.本文着重叙述这种方法的原理和应用.

## 一、概 述

多变量控制系统设计的一个关键性的工作就是解耦.解耦控制无论在学术上或实用上都有许多问题值得深入研究.近廿年来已提出的解耦方法有:状态反馈解耦、对角优势解耦、单顺向通道解耦(或称矩阵求逆解耦)、双顺向通道解耦等等. Sinskey 提出相对放大系数的概念<sup>[1]</sup>,并由此判断系统变量之间的耦合度,这种方法和对角优势解耦方法有某些共同之处,就是系统在满足一定的条件下,即使不进行解耦,也不会影响配对系统的正常运行. Rosenbrock<sup>[2]</sup>已证明在复数域上系统矩阵记为

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \vdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

假如满足行对角优势条件

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |a_{ij}| < |a_{ii}|, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2a)$$

或者满足列对角优势条件

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |a_{ij}| < |a_{jj}|, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (2b)$$

则第  $i$  个操作变量  $m_i$  与第  $i$  个被控制变量  $X_i$  配对,就无需再进行解耦. Sinskey 提出相对放

本文1987年8月11日收到.

大系数判断耦合度的方法,通过大量的工程实践和理论推导加以证明<sup>[3]</sup>.一个  $n \times n$  的系统

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & \cdots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \cdots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \cdots & G_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

并定义相对放大系数

$$\lambda_{ij} = \frac{\left. \frac{\partial X_i}{\partial m_j} \right|_{\bar{M}_j}}{\left. \frac{\partial X_i}{\partial m_j} \right|_{\bar{X}_j}} \quad (4)$$

$\bar{M}_j$  与  $\bar{X}_j$  表示条件向量, 其中  $\bar{M}_j$  表示向量  $M$  中的元素, 除第  $j$  个元素  $m_j$  变化外, 其它元素均保持恒定,  $\bar{X}_j$  表示向量  $X$  中元素除第  $j$  个元素  $X_j$  变化外, 其它元素均保持恒定, 则可构成一个相对放大系数阵列为

$$\begin{array}{c|cccc} \lambda_{ij} & X_1 & X_2 & X_3 & \cdots & X_n \\ \hline m_1 & \lambda_{11} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \cdots & \lambda_{1n} \\ m_2 & \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & \cdots & \lambda_{2n} \\ m_3 & \lambda_{31} & \lambda_{32} & \lambda_{33} & \cdots & \lambda_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_n & \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \lambda_{n3} & \cdots & \lambda_{nn} \end{array}$$

当  $\lambda$  阵列为一个对角线阵列时,  $m_i$  与  $X_i$  配对 ( $i=1, 2, \dots, n$ ), 系统操作变量与控制变量之间无耦合, 否则存在耦合. 在  $\lambda$  阵列中同一行或同一列的元素之和为 1, 假如存在

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n |\lambda_{ij}| < |\lambda_{ii}|, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5a)$$

或者

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n |\lambda_{ij}| < |\lambda_{jj}|, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (5b)$$

则系统不需要进行解耦.

上述研究的结果, 给解耦系统指出了一条简化系统设计的道路, 即使式 (2) 或式 (3) 的条件不满足, 我们也可以采用逐一分离的办法将耦合严重的配对支路解除耦合, 使剩下的配对支路均为弱耦合的支路, 这些弱耦合的支路就无需再解耦. 因此, 本文提出的逐次解耦与降低系统耦合度的解耦方法, 具有工程的实用性.

## 二、基本结构

图 1 (a) 表示原耦合对象的结构图, 表示如下关系

$$X = GU \quad (6)$$

式中,  $X$  为  $n$  维被控制向量,  $U$  为  $m$  维操作向量,  $G$  为  $n \times m$  耦合矩阵.

解耦矩阵加在  $G$  前面, 由两个顺向网络矩阵  $P$  与  $Q$

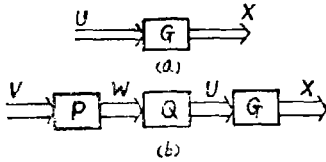
组成。即

$$X = GU = GQW = GQP V \quad (7)$$

矩阵  $Q$  与  $P$  的选择同矩阵  $G$  以及选定要分离(解耦)的支路有关。当分离的支路为  $m_j$  与  $X_i$  配对的支路时, 要求加入矩阵  $Q$  与  $P$  后使下列满足

$$GQP = \hat{G}_1 \quad (8)$$

图 1



式中,  $\hat{G}_1$  称为第一次分离的目标矩阵

$$\hat{G} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & \cdots & G_{1,j-1} & 0 & G_{1,j+1} & \cdots & G_{1m} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & \cdots & G_{2,j-1} & 0 & G_{2,j+1} & \cdots & G_{2m} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & \cdots & G_{3,j-1} & 0 & G_{3,j+1} & \cdots & G_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{i-1,1} & G_{i-1,2} & G_{i-1,3} & \cdots & G_{i-1,j-1} & 0 & G_{i-1,j+1} & \cdots & G_{i-1,m} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \hat{G}_{ij} & 0 & \cdots & 0 \\ G_{i+1,1} & G_{i+1,2} & G_{i+1,3} & \cdots & G_{i+1,j-1} & 0 & G_{i+1,j+1} & \cdots & G_{i+1,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & G_{n3} & \cdots & G_{n,j-1} & 0 & G_{n,j+1} & \cdots & G_{nm} \end{pmatrix} \quad (9)$$

与  $\hat{G}_1$  对应的  $Q$  及  $P$  分别记为  $Q_1$  与  $P_1$

$$Q_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & Q_{1j} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & Q_{2j} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & Q_{3j} & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & Q_{i-1,j} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & Q_{i+1,j} & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & Q_{nj} & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$P_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ P_{i1} & P_{i2} & P_{i3} & \cdots & P_{i,j-1} & 1 & P_{i,j+1} & \cdots & P_{im} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$Q_1$  与  $P_1$  的下标 1 表示第一次分离。

假如  $Q_i$  的第  $j$  列元素满足下列  $(n-1)$  个方程式

$$\sum_{k=1}^n G_{Lk} Q_{Kj} = 0, \quad \begin{matrix} L=1, 2, \dots, n \\ L \neq i \end{matrix} \quad (12)$$

其中

$$Q_{ij} = 1$$

则除了  $m_j$  能影响  $X_i$  外, 系统的其它操作变量均解除了对  $X_i$  的影响, 因此有

$$GQ_1 = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & \cdots & G_{1,j-1} & 0 & G_{1,j+1} & \cdots & G_{1m} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & \cdots & G_{2,j-1} & 0 & G_{2,j+1} & \cdots & G_{2m} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & \cdots & G_{3,j-1} & 0 & G_{3,j+1} & \cdots & G_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{i1} & G_{i2} & G_{i3} & \cdots & G_{i,j-1} & \hat{G}_{ij} & G_{i,j+1} & \cdots & G_{im} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & G_{n3} & \cdots & G_{n,j-1} & 0 & G_{n,j+1} & \cdots & G_{nm} \end{pmatrix} \quad (13)$$

其中

$$\hat{G}_{ij} = \sum_{k=1}^n G_{ik} Q_{Kj} \quad (14)$$

$$Q_{ij} = 1$$

假如  $P_1$  第  $i$  行的元素除  $\hat{G}_{ij}$  外, 取

$$P_{iK} = -\frac{G_{iK}}{\hat{G}_{ij}}, \quad \begin{matrix} K=1, 2, \dots, n \\ K \neq j \end{matrix} \quad (15)$$

此时有

$$GQ_1 P_1 = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & \cdots & G_{1,j-1} & 0 & G_{1,j+1} & \cdots & G_{1m} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & \cdots & G_{2,j-1} & 0 & G_{2,j+1} & \cdots & G_{2m} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & \cdots & G_{3,j-1} & 0 & G_{3,j+1} & \cdots & G_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{i-1,1} & G_{i-1,2} & G_{i-1,3} & \cdots & G_{i-1,j-1} & 0 & G_{i-1,j+1} & \cdots & G_{i-1,m} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \hat{G}_{ij} & 0 & \cdots & 0 \\ G_{i+1,1} & G_{i+1,2} & G_{i+1,3} & \cdots & G_{i+1,j-1} & 0 & G_{i+1,j+1} & \cdots & G_{i+1,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & G_{n3} & \cdots & G_{n,j-1} & 0 & G_{n,j+1} & \cdots & G_{nm} \end{pmatrix} \quad (16)$$

这样,  $m_i$  与  $X_j$  配对的支路就完全从系统中分离出来, 分离后的系统结构可用图2表示。图2分成三个层次, 上面部分为分离出的支路, 下面部分为未分离的部分, 中间部分是将  $m_i$  与  $X_j$  支路分离的解耦网络。操作变量向量与被控制变量各分离出一个变量后, 自然各降低一维, 这些未分离的变量重新定义

$$M^{(1)} = \begin{pmatrix} u_1^{(1)} \\ u_2^{(1)} \\ \vdots \\ u_{m-1}^{(1)} \end{pmatrix}, \quad X^{(1)} = \begin{pmatrix} X_1^{(1)} \\ X_2^{(1)} \\ \vdots \\ X_{n-1}^{(1)} \end{pmatrix}$$

$G^{(1)}$  为  $M^{(1)}$  与  $X^{(1)}$  的耦合矩阵

$$G^{(1)} = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & \cdots & G_{1,j-1} & G_{1,j+1} & \cdots & G_{1m} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & \cdots & G_{2,j-1} & G_{2,j+1} & \cdots & G_{2m} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & \cdots & G_{3,j-1} & G_{3,j+1} & \cdots & G_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{i-1,1} & G_{i-1,2} & G_{i-1,3} & \cdots & G_{i-1,j-1} & G_{i-1,j+1} & \cdots & G_{i-1,m} \\ G_{i+1,1} & G_{i+1,2} & G_{i+1,3} & \cdots & G_{i+1,j-1} & G_{i+1,j+1} & \cdots & G_{i+1,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & G_{n3} & \cdots & G_{n,j-1} & G_{n,j+1} & \cdots & G_{nm} \end{pmatrix}$$
$$\triangleq \begin{pmatrix} G_{11}^{(1)} & G_{12}^{(1)} & \cdots & G_{1,m-1}^{(1)} \\ G_{21}^{(1)} & G_{22}^{(1)} & \cdots & G_{2,m-1}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G_{n-1,1}^{(1)} & G_{n-1,2}^{(1)} & \cdots & G_{n-1,m-1}^{(1)} \end{pmatrix} \tag{17}$$

矩阵  $G^{(1)}$  就是矩阵  $G$  划去第  $i$  行及第  $j$  列后的余下元素按原顺序组成的新矩阵。重复上述过程，可以得到第  $K$  次降维的矩阵  $G^{(i)}$ 。假如  $G^{(i)}$  是一个对角优势矩阵，或者系统具有对角优势的相对放大系数阵列，即可停止支路的分离。一般地说，系统变量强耦合的支路是少数的，多数的支路是弱耦合，因此分离几个支路以后，可能出现对角优势矩阵，从而使一个大而复杂的系统设计问题得到简化。

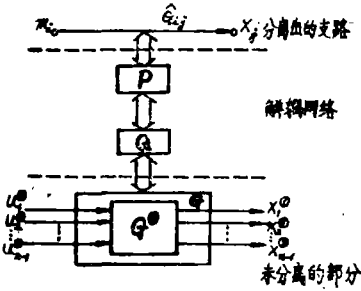


图 2

三、应用举例

为了说明本方法的可用性与实用性，本文以上海金山石化总厂裂解炉温度对象为例说明。该系统按静态的观点描述的对象耦合模型为

$$X = GU$$
(18)

其中

$$X = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix}$$
$$G = \begin{pmatrix} 0.589 & 0.195 & 0 & 0 \\ 0.195 & 0.589 & 0.195 & 0 \\ 0 & 0.195 & 0.589 & 0.195 \\ 0 & 0 & 0.195 & 0.589 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} \end{pmatrix} \tag{19}$$

若要求  $u_1-X_1$ ,  $u_2-X_2$ ,  $u_3-X_3$  及  $u_4-X_4$  配对，显然系统中影响最严重的支路是  $u_2-X_2$ 、 $u_3-X_3$

支路, 因此可以从这两个支路中, 任选一个支路先分离, 假设先分离  $u_3$ - $X_3$  支路, 分离支路的传递系数为

$$\frac{X_3}{u_3} = 0.589$$

矩阵  $G$  剩下元素重新构成矩阵  $G_1$ , 且有

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.589 & 0.195 & 0 \\ 0.195 & 0.589 & 0 \\ 0 & 0 & 0.589 \end{pmatrix}$$

$u_3$ - $X_3$  支路同  $G$  的解耦网络矩阵为

$$Q_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & Q_{13} & 0 \\ 0 & 1 & Q_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{43} & 1 \end{pmatrix}, \quad P_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ P_{31} & P_{32} & 1 & P_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

其中  $Q_{13}$ 、 $Q_{23}$  与  $Q_{43}$  满足式 (12) 条件

$$\begin{cases} G_{11}G_{13} + G_{12}Q_{23} + G_{13} + G_{14}Q_{43} = 0 \\ G_{21}Q_{13} + G_{22}Q_{23} + G_{23} + G_{24}Q_{43} = 0 \\ G_{41}Q_{13} + G_{42}Q_{23} + G_{43} + G_{44}Q_{43} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

即满足

$$\begin{aligned} 0.589 \times Q_{13} + 0.195 \times Q_{23} &= 0 \\ 0.195 \times Q_{13} + 0.589 \times Q_{23} &= -0.195 \\ 0.580 Q_{43} &= -0.195 \end{aligned}$$

由最后一式求得

$$Q_{43} = -\frac{0.195}{0.589} = -0.331$$

由前面两式得到

$$\begin{pmatrix} Q_{13} \\ Q_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.589 & 0.195 \\ 0.195 & 0.589 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ -0.195 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.9069 & -0.6313 \\ -0.6313 & 1.9069 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -0.195 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.1231 \\ -0.3728 \end{pmatrix}$$

且知

$$\begin{aligned} \hat{G}_{ij} &= \hat{G}_{33} = G_{33} + G_{31}Q_{13} + G_{32}Q_{23} + G_{34}Q_{43} \\ &= 0.589 + 0.195 \times (-0.3728) + 0.195 \times (-0.331) \\ &= 0.452 \end{aligned}$$

$P_{31}$ 、 $P_{32}$  与  $P_{34}$  为

$$\begin{aligned} P_{31} &= -\frac{G_{31}}{\hat{G}_{ij}} = \frac{0}{0.580} = 0 \\ P_{32} &= -\frac{G_{32}}{\hat{G}_{ij}} = \frac{-0.195}{0.580} = -0.336 \\ P_{34} &= -\frac{G_{34}}{\hat{G}_{ij}} = \frac{-0.195}{0.580} = -0.336 \end{aligned}$$

分离  $u_3$ - $X_3$  支路后, 该支路的传递系数由 0.589 变为 0.508, 剩下的变重构成一个  $3 \times 3$  的

耦合矩阵

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.589 & 0.195 & 0 \\ 0.195 & 0.589 & 0 \\ 0 & 0 & 0.589 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_4 \end{bmatrix}$$

因为  $u_4-X_4$  支路同剩下的其它支路没有耦合, 可以直接分离出来, 最后得到一个  $2 \times 2$  的耦合系统

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.589 & 0.195 \\ 0.195 & 0.589 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

式(21)用流图表示如图3所示。 $2 \times 2$ 系统解耦有一个简单的方法, 就是采用前馈补偿方法, 图中所示的虚线与前馈补偿支路

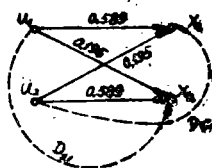


图3

$$D_{12} = D_{21} = -\frac{0.195}{0.589} = -0.336$$

前馈补偿网络为

$$D_1 = \begin{bmatrix} 1 & -0.336 \\ -0.336 & 1 \end{bmatrix}$$

整个解耦网络的结构如图4所示。解耦网络包括三个网络:  $Q_1$ 、 $P_1$  与  $D_1$  网络。在  $G$  与  $D$  的网络部分中, 实践代表  $G$  网络, 虚线代表  $D_1$  网络。

系统的分离过程分成三个层次, 首先分离  $X_3$ , 再分离  $X_4$ , 最后使  $X_1$  与  $X_2$  分离。 $D_1$  网络也可以移至  $P_1$  网络的前面, 此时  $D_1$  网络作为  $D$  的一个局部网络, 如图5所示。

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

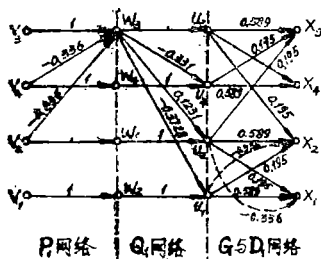


图4

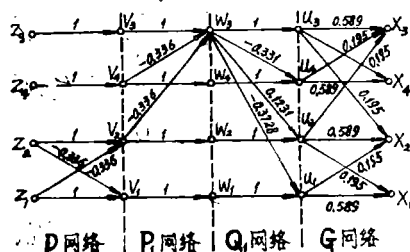


图5

## 四、逐次降维解耦方法的证明

利用逆运算可以证明逐次降维解耦方法的正确性。这里首先以本文例子进行验证

$$\begin{aligned}
 GQ_1 &= \begin{pmatrix} 0.589 & 0.195 & 0 & 0 \\ 0.195 & 0.589 & 0.195 & 0 \\ 0 & 0.195 & 0.589 & 0.195 \\ 0 & 0 & 0.195 & 0.589 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0.1231 & 0 \\ 0 & 1 & -0.3728 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -0.331 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0.589 & 0.195 & 0 & 0 \\ 0.195 & 0.589 & 0 & 0 \\ 0 & 0.195 & \hat{G}_{33} & 0.195 \\ 0 & 0 & 0 & 0.589 \end{pmatrix} \quad (22)
 \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
 &\hat{G}_{33} = 0.580 \\
 GQ_1P_1 &= \begin{pmatrix} 0.589 & 0.195 & 0 & 0 \\ 0.195 & 0.589 & 0 & 0 \\ 0 & 0.195 & 0.580 & 0.195 \\ 0 & 0 & 0 & 0.589 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.336 & 1 & -0.336 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0.589 & 0.195 & 0 & 0 \\ 0.195 & 0.589 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.580 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.580 \end{pmatrix} \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 GQ_1P_1D &= \begin{pmatrix} 0.589 & 0.195 & 0 & 0 \\ 0.195 & 0.589 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.580 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.580 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -0.336 & 0 & 0 \\ -0.336 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 0.523 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.523 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.580 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.580 \end{pmatrix} \quad (24)
 \end{aligned}$$

## 五、结 论

逐次降低系统维数的方法是选择耦合度最严重的一个支路先解耦，并从耦合的系统中分离出来，从而降低系统的耦合状态。这种方法除了在工业生产过程控制系统应用外，还可以推广到大系统。



## 参 考 文 献

- [1] Shinskey, F.G., *Process Control Systems*, McGraw-Hill, ( 1979 ).
- [2] Rosenbrock, H.H., *State Space and Multivariable Theory*, Nelson, ( 1970 ).
- [3] 王永初, 耦合系统的相对放大系数定理及其证明, 自动化与仪器仪表, 4 ( 1983 ),
- [4] Petal, R. V. and Munro, N. , *Multivariable System Thary and Design*, Pergamon Press, ( 1982 ).
- [5] Macfarlane, G.J., *Frequency-Response Methods in Control Systems*, IEEE Press, ( 1979 ).

## A Decoupling Method for Decreasing the Dimensien in Succession

Wang Yongchu

### Abstract

A decoupling method which decouples the coupling elecents from a system was presented in this paper for decresing the dimension in succession. The design of large system can be greatly simplified by combining this method with Rosenbrock's diagnostic method of diagonal dominance and Sinskey's method of relative amplification coefficient.

The theory of this method and its wide application in processcontrol system are described briefly in this paper.