

最优控制系统的同步设计方法

王永初

(精密机械工程系)

摘要 同步设计是多变量控制系统设计一种新的工程化方法,包括解耦、重构、优化控制与优化整定。在设计过程中,设计任务的主要项目是同时完成的。本设计方法的显著特点,是交互影响对象在解耦以后可保留被控主通道原先的特性。本文介绍同步设计原理及其应用。

关键词 多变量系统, 优化, 解耦, 重构

0 前言

工业生产过程向大容量、高速及大型机组的方向发展,系统设计已不再是处理单个回路或单变量的控制问题,而是涉及许多变量的关联调节与控制问题。多变量优化控制系统的设计方法近20年来迅速发展,就是客观上的许多原因形成的。将一个庞大的多变量系统,在一台计算机上完成在线优化控制是十分困难的。正因为如此,近10年来国内外许多研究与制造自动化工具的单位,纷纷推出集中分散控制系统的装置,如霖尼韦尔公司的TDC-2000,3000,福克斯波罗公司的spectrum系统,日本横河Y·P·I系统,西德西门子公司Teleperm等。但从目前的应用上看,真正发挥装置实际功能的系统,几乎微乎其微,这同多变量复杂系统的工程化设计方法研究不够有关。尽管这些年国内外出版了大量关于多变量系统的著作,所解决的问题还是停留在低维、低阶的线性系统方面。1987年我们接爱国家

“七·五”攻关一个课题,其目标在于解决多变量优化系统的设计方法问题。

1 整体结构的分解与协调

图1为集散系统的一般结构原理图,系统包括三级控制与基础控制单元。过程基础控制单元就是目前的单个独立控制子系统。Ⅲ级也

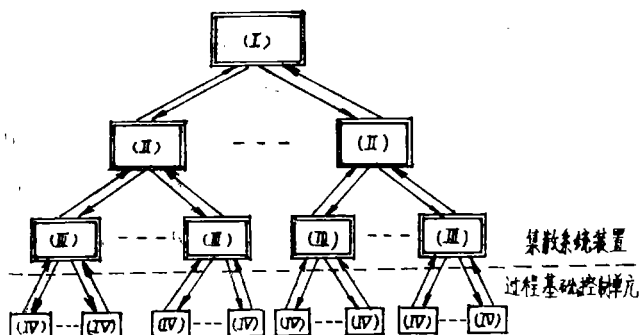


图1 集散系统的一般结构原理图

本文1990—04—28收到。

称 SPC 控制级, 即给定值设置控制系统, II 级是协调与局部优化决策级, I 级为管理与全局优化决策级。有些集散系统 II 与 III 级合并在一起。集散系统体现过程控制 80 年代的国际水平。

过程基础控制单元, 实际上不是独立无关的子系统。生产过程一环扣一环, 变量之间彼此会有影响, 就以最简单的加压过程而言, 压力与温度, 成分与流量都有极其密切的关系。这就要求系统设计者有一个整体的概念, 我们的同步设计方法就是在这样的背景下提出, 目的在于解决 II 级以下系统的设计与综合分析问题。

多变量优化控制系统, 建议采用图 2 的结构。从质构看基本与系统不是平常那种自身封闭的系统, 它同外界即 (II)、(III) 有着在线的信息交换, 通过这种信息交换而将所有的系统有机地联系在一起。图 2 的结构不同于一般信号流图, 所有的信息均为向量组。在这种结构中, $D(s)$ 与 $FD(s)$ 模块起着特殊的作用。 $D(s)$ 为解耦模块, $D(s)$ 使 $G(s)$ 各个控制通道由于干涉影响演变成互相独立, 即使 $G(s)D(s)$ 成为一个对三角形矩阵传递函数。由于解耦各控制通道的特性会发生变化, 给优化控制系统设计造成很大的困难。

$FD(s)$ 为重整模块, 使解耦扭曲的控制通道特性恢复原先的面貌。这样各个与系统实施 SPC 控制就有可能。SPC 模块是动态或静态给定值优化设置模块, 即实现生产过程参数的优化。 $P(s)$ 可以是 PID 调节模型, 也可以是其它优化控制器模型, 其作用是实现控制系统内部参数的优化。这种结构的好处工程性强, 内部改变控制方式方便, 具有较高的系统设计灵活性, 同时从系统外实现 SPC 控制更加容易, 可以不用考虑 DDC 系统与 SPC 控制中出现的逆向影响。

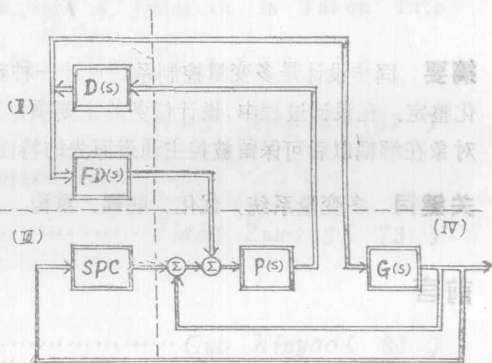


图 2 多变量优化系统的构成

2 $D(s)$ 与 $FD(s)$ 模块的构成与应用

$D(s)$ 与 $FD(s)$ 可以看作是 $P(s)$ (控制器向量模块) 的内模。若对象特性记成

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_x \\ C_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{11} & A_{1x} & A_{1n} \\ A_{x1} & A_{xx} & A_{xn} \\ A_{n1} & A_{nx} & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_x \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_x \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

简记为

$$C = GU, \quad (2)$$

其中 C_1 与 C_n 是加入 $D(s)$ 后保留的对象变量组, C_x 是加入 $D(s)$ 后要从 $G(s)$ 中分离的变量组, C 与 U 均为 n 维向量, G 为 $n \times n$ 维传递函数矩阵。显然, 若 C_1 为 i 维向量, C_x 为 k 维向

量, 则 C_n 应为 $(n-i-k)$ 维向量, 同理可知 A_{11} 为 ixi 维传递函数矩阵, A_{xx} 为 kxk 维, A_{nn} 为 $(n-i-k) \times (n-i-k)$ 维传递函数矩阵, A_{1x} 为 $i \times k$ 维, A_{x1} 为 $k \times i$ 维, 其它以此类推. 为了使分离计算方便, 式 (1) 重新组合成

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_n \\ \vdots \\ C_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{1n} & A_{1x} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{nn} & A_{nx} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{x1} & A_{xn} & A_{xx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \\ \vdots \\ U_x \end{bmatrix}, \quad (3)$$

进一步合并为

$$\begin{bmatrix} C_I \\ \vdots \\ C_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{II} & G_{IX} \\ \vdots & \vdots \\ G_{XI} & G_{XX} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_I \\ \vdots \\ U_x \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 I 为保留的部分, X 为分离的部分,

$$C_I = \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix}, \quad U_I = \begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}, \quad G_{II} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{1n} \\ \vdots & \vdots \\ A_{n1} & A_{nn} \end{bmatrix},$$

$$G_{xx} = A_{xx}, \quad G_{1x} = \begin{bmatrix} A_{1x} \\ \vdots \\ A_{nx} \end{bmatrix}, \quad G_{x1} = [A_{x1} \mid A_{xn}].$$

G_{II} 为 $(n-k) \times (n-k)$ 维传递函数矩阵, G_{1x} 与 G_{x1} 分别为 $(n-k) \times k$ 维与 $k \times (n-k)$ 维传递函数矩阵. 现选择 $D(s)$ 为如下结构

$$D(s) = \begin{bmatrix} I_I & D_{1x} \\ \vdots & \vdots \\ D_{x1} & I_x \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 I_I 为 $(n-k) \times (n-k)$ 单位传递函数矩阵, I_x 为 $k \times k$ 单位传递函数矩阵, D_{1x} 与 D_{x1} 分别为 $(n-k) \times k$ 维与 $k \times (n-k)$ 维传递函数矩阵, 并取

$$D_{1x} = -G_{11}^{-1} G_{1x}, \quad (6)$$

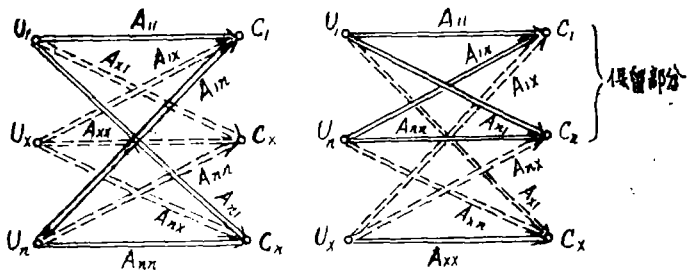
$$D_{x1} = -G_{xx}^{-1} G_{x1}, \quad (7)$$

这时 GD 演变成一个若当形传递函数矩阵, C_I 与 C_x 分离成两组完全不相关的向量, 即

$$GD = \begin{bmatrix} G_{II} = G_{1x} G_{xx}^{-1} G_{x1} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & G_{xx} - G_{x1} G_{11}^{-1} G_{1x} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

这种结构方式虽然 C_I 与 C_x 互不干扰, 但 C_I 与 U_I 、 C_x 与 U_x 的传递关系完全改变, 估计这种解耦后的系数新特性, 则不是一件简单的工作, 每一条传递支路在解耦后传递函数有理多项式的分子与分母部分的阶次都会增加, 因此解耦后必须随即进行模型简化与降阶, 否则难于实现在线解耦与优化控制.

图 3 为原对象模型结构信号流图, 及重新组合后的信号



(a) 原结构

(b) 重新组合后的结构

图 3 对象结构模型流图

流程图。图4为加入 $D(s)$ 与 $FG(s)$ 后要求的对象模型信号流程图。图中双线流线均表示传递关系

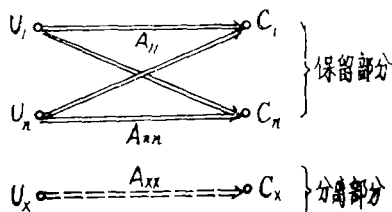


图4 要求的模型信号流程图

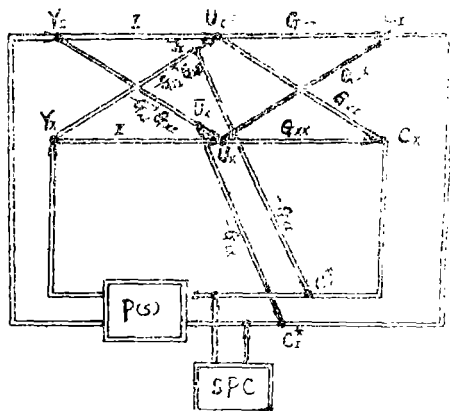


图5 $FD(s)$ 网络的引入

为矩阵或向量。将 U_I 与 U_N 合并为 U_I , C_I 与 C_N 合并为 C_I 后,按照图5的方式接入 $D(s)$ 与 $FD(s)$ 模块,就可以得到图4所要求的模型结构。

$FD(s)$ 网络跨接在由 \bar{U}_I 、 \bar{U}_x 作为点与 C_x^* 与 C_I^* 作用点之间

$$\begin{bmatrix} C_I^* \\ C_x^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -G_{Ix} \\ -G_{Ix} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_I \\ \bar{U}_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_I \\ C_x \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中

$$FD(s) = \begin{bmatrix} 0 & -G_{Ix} \\ -G_{Ix} & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

3 系统设计

为说明本方法的具体实施过程,这里以某加热炉对象为例,对象特性为

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{0.8}{s+1} & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & \frac{0.8}{s+1} & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & \frac{0.8}{s+1} & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} \\ 0 & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & \frac{0.8}{s+1} & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & \frac{0.8}{s+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

现要求 C_3 与 C_5 从系统中分离出来, 此时可定义

$$C_x = \begin{bmatrix} C_3 \\ C_5 \end{bmatrix}, \quad U_x = \begin{bmatrix} u_3 \\ u_5 \end{bmatrix}, \quad C_1 = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}, \quad U_1 = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} C_1 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix}, \quad \text{其中 } C_n = C_4$$

于是式 (11) 可演变为式 (4) 的排列, 同式 (4) 对应的部分为

$$G_{11} = \begin{bmatrix} \frac{0.8}{s+1} & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & 0 \\ \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & \frac{0.8}{s+1} & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} \\ 0 & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & \frac{0.8}{s+1} \end{bmatrix},$$

$$G_{1x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & 0 \end{bmatrix}, \quad G_{x1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G_{xx} = \begin{bmatrix} \frac{0.8}{s+1} & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} \\ \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & \frac{0.8}{s+1} \end{bmatrix},$$

由式 (6) 与式 (7) 分别得到

$$D_{1x} = -G_{11}^{-1}G_{1x} = \begin{bmatrix} \frac{-0.064}{(2s+1)(2.048s^2+2.048s+0.256)} & 0 \\ \frac{0.128}{2.048s^2+2.048s+0.256} & 0 \\ \frac{-0.4(2.56s^2+2.56s+0.48)}{(2s+1)(2.048s^2+2.048s+0.256)} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \begin{bmatrix} d_1 & 0 \\ d_1 & 0 \\ b_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_{x1} = -G_{x1}^{-1}G_{x1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{0.32}{2.56s^2+2.56s+0.48} \\ 0 & 0 & \frac{0.16}{2.56s^2+2.56s+0.48} \end{bmatrix} \Delta \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & d_5 \end{bmatrix},$$

D_{1x} 的输入向量为 Y_x , 输出向量为 U_1

$$Y_x = \begin{pmatrix} Y_3 \\ \vdots \\ Y_5 \end{pmatrix}, \quad U_1 = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_4 \end{pmatrix},$$

D_{xI} 的输入向量为 Y_I 输出向量为 U_x

$$Y_1 = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_4 \end{pmatrix}, \quad U_x = \begin{pmatrix} u_3 \\ \vdots \\ u_5 \end{pmatrix},$$

于是构成 (U_1, C_1) 与 (U_x, C_x) 分离的解耦网络如图 6 (a) 所示. FD 重整网络为

$$FD = \begin{pmatrix} 0 & -G_{Ix} \\ -G_{xI} & 0 \end{pmatrix},$$

FD 的输入向量为 $\begin{pmatrix} U_1 \\ U_x \end{pmatrix}$, 输出向量为 $\begin{pmatrix} C_1^* \\ C_x^* \end{pmatrix}$. 因此有如下关系:

$$\begin{pmatrix} C_1^* \\ C_2^* \\ C_4^* \end{pmatrix} = -G_{Ix} \begin{pmatrix} \bar{u}_3 \\ \vdots \\ \bar{u}_5 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0.4 & 0 \\ (2s+1)(s+1) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{u}_3 \\ \vdots \\ \bar{u}_5 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{pmatrix} C_3^* \\ C_5^* \end{pmatrix} = -G_{xI} \begin{pmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \vdots \\ \bar{u}_4 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0 & (2s+1)(s+1) \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{u}_1 \\ \bar{u}_2 \\ \vdots \\ \bar{u}_4 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

FD 网络的结构如图 6 (b) 所示. 应用时 \bar{U} 接至被控对象 G 的输入端, C^* 加接在被控制向量输

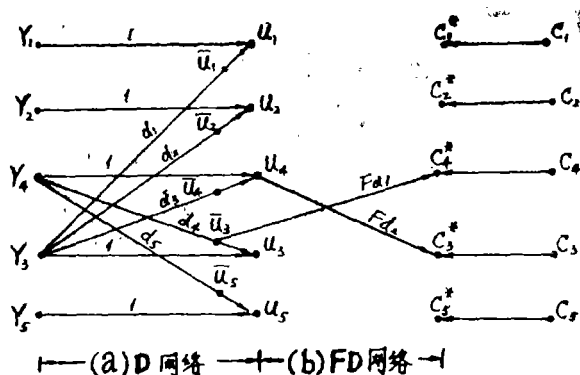


图 6 D 网络与 FD 网络

出端. 图中 Fd_1 与 Fd_2 表示为

$$Fd_1 = Fd_2 = - \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)}.$$

数学上完全可以证明, 按照图 6 所示的 D 与 FD 网络结构并按图 5 所示的方式联接, 式 (11)

对象将被解耦并重整成两组分别无关的向量组。其等效对象特性为

$$\tilde{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{0.8}{s+1} & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{0.4}{(2s+1)} & \frac{0.8}{s+1} & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & \frac{0.8}{s+1} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \frac{0.8}{s+1} & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{0.4}{(2s+1)(s+1)} & \frac{0.8}{s+1} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

如果仅采用 D 模块, 尽管 $G(s)$ 也可以成为一个对角形分块矩阵, 但其元素的阶次却大大增加, 除非立即采取模型降阶处理, 否则继续进行变量的分离会发生很大的困难。譬如 $G(s)$ 加入 D 以后, $G(s)$ 中的 $\tilde{g}_{33}(s)$ 由 $0.8/(s+1)$ 变成

$$\tilde{g}_{33}(s) = \frac{2.048s^2 + 2.048s + 0.256}{(s+1)(2.56s^2 + 2.56s + 0.48)}, \quad (15)$$

$\tilde{g}_{33}(s)$ 有理传递函数的阶次同时增加 2 阶, 又如 $\tilde{g}_{44}(s)$, 亦由 $0.8/(s+1)$ 变成

$$\tilde{g}_{44}(s) = \frac{6.534s^4 + 13.107s^3 + 9.401s^2 + 2.048s + 0.128}{(s+1)(2s+1)^2(2.048s^2 + 2.048s + 0.256)}. \quad (16)$$

但是, 当 FD 模块再引入后, $\tilde{g}_{33}(s)$ 又可以由式 (15) 的 (2/3) 阶模型压缩为 $0.8/(s+1)$ 的 (0/1) 阶模型。同样 $\tilde{g}_{44}(s)$ 也从式 (16) 所示的 (4/5) 阶模型压缩为 (0/1) 模型 $0.8/(s+1)$ 。由于 D 模块的设计我们已开发专用的辅助设计软件包, 输入 $G(s)$ 有关结构参数就可以确定 D 参数。而 FD 完全同 $G(s)$ 直接相关, 也可以说是 $G(s)$ 固有特性的一部分加以定形产生, 不需要采取新的计算。因此, D 确定后, FD 便可直接确定, 这在工程中应用是很方便的。

4 结语

一个 $n \times n$ 维的多变量耦合系统利用解耦模块 D 与重整模块 FD , 可以逐次分离, 最后得到 n 个独立单变量控制系统, 使目前难于控制的非线性 (如包含滞环或不灵敏带) 与大滞后的多变量控制, 寻到一种有效的控制方法。因为各个系统一旦独立, 互相间的交互影响全解除, 系统设计工作就转移到单个单变量系统。目前线性单变量系统的设计方法已成熟, 如根轨迹法与频率法, PID 优化参数整定法, 达林方法等。还可以应用状态反馈, 实现状态最优反馈 (包括具有观测器的优化控制器与鲁棒控制器等)。对于难于控制的大滞后等对象也可以直接采用内模方法或预估控制。从这个意义上说, 本设计方法的推广可使目前最新的控制理论在工业生产中的应用, 大大增加其现实性。

本研究内容是国家“七·五”重点项目优化控制制算式课题的一部分, 其它研究工作已经通过国内专家评议, 本文仅作为以前成果的补充, 及“解耦、模型简化与优化控制的同步设计”如何应用于集散系统装置的说明。

参 考 文 献

- [1] 王永初、任秀珍著, 自动化系统设计的系统学, 重庆出版社, (1989).
- [2] Patel, R. V. and Munro, N., *Multivariable Theory and Design*, Pergamon Press, (1982).
- [3] Kokotovic, P. V., Recent Trends in Feedback Design: an Overview, *Automatica*, 21, 2 (1985).
- [4] Schunacher, J., Compensator Synthesis Using (C,A,B,) Pairs, *I. E. E. E. Trans, A-C*, 25, 6 (1980).
- [5] Callier, F. M. and Desoer, C. A., *Multivariable Feedback Systems*, Springer-Verlag, (1982).

Synchronized Design of an Optimal Control System

Wang Yongchu

(Department of precision Mechanical Engineering)

Abstract As a new engineering method for designing a multivariable control system, the method of synchronized design covers decoupling, reconstruction, optimal control, and optimal tuning. In the layout procedure, all the important items of designing task can be completed simultaneously. The method is characterized by holding the original character of the main controlled paths after the interactive plants are decoupled. Both the principle and applications of the method are discussed in this paper.

Key words multivariable system, optimization, decoupling, reconstruction.